



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HELI JAAKOLA
HULEVESIEN HALLINTA MALLINTAMALLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Rintala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Luon-
nontieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 6. toukokuuta 2015

TIIVISTELMÄ

HELI JAAKOLA: Hulevesien hallinta mallintamalla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 135 sivua

Heinäkuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Rintala

Avainsanat: Hulevesi, mallinnus, valunta, viivytysrakenne, SWMM, rationaalinen menetelmä

Hulevesien hallinnan ohjeistusta sekä vastuita on uudistettu Suomessa viimevuosina. Maankäyttö- ja rakennuslain päivitys astui voimaan elokuussa 2014, jolloin hulevesien hallinta siirrettiin kuntien vastuulle osaksi asemakaavoitusta. Vuonna 2012 ja 2013 julkaistiin uutta ohjeistusta hulevesien hallintaan ja mitoitukseen. Annetut mitoitusarvot perustuvat riskinarviointiin ja ovat ohjeellisia. Ohjeistus tunnistaa mallinnuksen tuomia hyötyjä hulevesien hallintaan, mutta ei ota kantaa laskentamenetelmien yms. valintaan.

Työn tarkoituksena on verrata kahden hulevesien hallinnan mallinnusohjelman (A ja B) välisiä eroja, kolmen hydraulisen laskentamenetelmän (dynaaminen, kinemaattinen ja convex) vaikutuksia, kahden valunnan laskentamenetelmän (MRM ja SWMM) sekä käsin tehdyn laskennan eroja. Vaikutuksia tarkasteltiin kahdessa Nurmijärvellä sijaitsevassa esimerkkikohteessa: kaavoitettavalle Kylänpään alueelle arvioitiin viivytystarvetta ja kiertoliittymän suunnittelun yhteydessä määritettiin Rajamäen alueen verkoston kapasiteetti- ja viivytystarve. Viivytystarve laskettiin lisäksi vaihtoehtoisella laskentata- valla, joka perustui tehokkaan läpäisemättömän pinnan määrään (EIA) 16 mm sateella.

Mitoitussateen valinnalla on suurin vaikutus viivytysrakenteen kokoon. Viiden vuoden ero sateen toistuvuudessa vaikutti viivytystarpeeseen 40 %. Hydraulinen laskentamenetelmä vaikutti viivytystarpeeseen verkoston toimintakyvyn, virtausnopeuden ja viipymän kautta. Menetelmien välinen ero viivytysrakenteen tilavuudessa oli 5...20 %.

Valuntamenetelmä, käytetyt kertoimet ja arvot vaikuttavat suoraan muodostuvan huleveden määrään. Rationaalisessa menetelmässä huleveden suhteellinen osuus on vakio, SWMM-menetelmässä määrään vaikuttavat myös maaperän ominaisuudet kuten imeyntä ja painannesäilyntä. Menetelmien väliseen eroon vaikuttaa myös sateen määrä.

Pienin viivytystarve saavutettiin ohjelmalla A, SWMM-menetelmällä käytettäessä dynaamista laskentamenetelmää. Suurin viivytystarve muodostui käsin laskemalla. Käytettäessä vaihtoehtoista, EIA:n määrään perustuvaa laskentatapaa, viivytystarve Rajamäellä pieneni 20...25 %.

Nykyinen hulevesiohjeistus on puutteellista mallinnuksen ohjeistuksen suhteen. Valittu laskentamenetelmä vaikuttaa merkittävästi laskentatulosten suuruusluokkaan. Nykyinen hulevesien hallinnan mitoitusohjeistus voi johtaa hulevesijärjestelmien ylimitoitukseen.

ABSTRACT

HELI JAAKOLA: Stormwater management by modelling

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 134 pages

July 2015

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

Major: Water and Waste Management Engineering

Examiner: Professor Jukka Rintala

Keywords: stormwater management, runoff, modelling, storage volume, SMWW, rational method

Guidelines and responsibilities for stormwater management have been reformed during the past few years in Finland. An update of land-use and construction law in August 2014 transferred stormwater management to be part of detailed land-use planning. New manuals for stormwater management and drainage design were released in 2012 and 2013. Design guidelines are based on risk assessment and are directive. New introductions recognize the benefits of modelling but there is no guidance for the selection of modelling parameters or calculation methods.

The purpose of this thesis is to compare the differences between two stormwater management programs (A and B), three different hydraulic routing methods (dynamic, kinematic and convex), two hydrology methods (modified rational method and SWMM) and manual calculations. Impacts were observed in two modelling case studies in Nurmijärvi. Demand for stormwater detention volume was studied in case Kylänpää during detailed land-use planning. Capacity of stormwater network and the required volume of detention storage were defined during roundabout planning in case Rajamäki. The needed detention volume was also defined with an alternative method that is based on effective impervious area (EIA) and a 16 mm rainfall.

The chosen precipitation input has the most significant impact on the amount of required detention storage volume. The effect of five years in storm frequency is 40 %. Hydraulic method influences network attributes like velocity of water and delay. Impact of used hydraulic method is 5...20 %.

Hydrology method and used parameters directly affect the runoff gain. With the rational method the proportion of runoff generated from precipitation is constant. With the SWMM method the properties of the soil, like conductivity and depression depth, affects the volume gain. The amount of rainfall also affects the differences of these methods.

The smallest detention storage volume was gained with program A while using the SWMM method and dynamic routing method. The biggest need for storage volume was achieved by manual calculations. In the case of Rajamäki the need for storage volume was decreased by 150 m³ or 20...25 % when using the EIA method.

Guidelines for stormwater modelling are defective. The choice of the used calculation method significantly affects the results and the use of current stormwater guidelines can cause oversized structures.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereella, Sweco Ympäristö Oy:lle. Kiitän lämpimästi työtä ohjannutta suunnittelupäällikkö Piia Alhoa Sweco Ympäristö Oy:stä ja työn tarkastajaa professori Jukka Rintalaa. Haluan myös kiittää Nurmijärven kaupunkia yhteistyöstä, sekä työtovereita tuesta ja ymmärryksestä työn eri vaiheissa.

Kiitokset myös perheelleni ja ystäväilleni kärsivällisyydestä ja kannustuksesta työtä tehdessä.

Tampereella, 10.07.2015.

Heli Jaakola

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	HULEVESIEN HALLINNAN PERUSTEET	2
2.1	Hulevesien hallinnan vastuut ja määräykset	3
2.1.1	ELY-keskuksen vastuut ja velvollisuudet	4
2.1.2	Kunnan vastuut ja velvollisuudet	4
2.1.3	Kiinteistön omistajan vastuut ja velvollisuudet	6
2.2	Hulevesien yhteys muuhun suunnitteluun	6
2.2.1	Kaavoitus	6
2.2.2	Pohjaveden ja pintavesien suojele	9
2.2.3	Rakentaminen	11
2.2.4	Rakentamisen aikainen hulevesien hallinta	12
2.2.5	Ojitus	13
2.3	Hulevesien johtaminen	15
2.3.1	Pintaajohtamismenetelmät	15
2.3.2	Hulevesiverkosto	19
2.3.3	Salaojat ja suotosalaojat	21
2.4	Viivytyksrakenteet	22
2.5	Imeytys- ja suodatusrakenteet	24
2.5.1	Imeytysrakenteet	25
2.5.2	Suodatusrakenteet	26
2.5.3	Biopidätysalueet	27
2.5.4	Läpäisevät päällysteet	28
2.6	Lammikko ja kosteikot	29
2.7	Öljynerotuskaivot	31
2.8	Kasvillisuus	32
2.9	Tulviminen ja tulvareitit	32
3.	HULEVESIEN HALLINNAN MITOITUSKÄYTÄNNÖT SUOMESSA	35
3.1	Mitoitusvirtaama	35
3.1.1	Mitoitussade	36
3.1.2	Valumakerroin	38
3.2	Hulevesien johtamisjärjestelmät	39
3.2.1	Ojat ja painanteet	39
3.2.2	Rummut	41
3.2.3	Hulevesiviemärit	43
3.2.4	Kiinteistökohtaiset järjestelmät	44
3.3	Hulevesien määrällinen ja laadullinen hallinta	45
3.3.1	Viivytyksrakenteet	45
3.3.2	Maanpäällisen viivytyksrakenteen mitoitus	46
3.3.3	Veden viivytys huokostilassa	46

3.4	Tulvareitti.....	47
3.5	Vaihtoehto viralliselle mitoitusohjeistukselle	48
4.	HULEVESIEN HALLINNAN TARVE	52
5.	HULEVESIEN HALLINTA MALLINTAMALLA.....	53
5.1	Mallinnuksen vaiheet.....	53
5.2	Käyttö.....	54
5.3	Tulvimisen mallinnus	55
5.4	Epävarmuustekijät ja virheet mallissa	56
5.5	Sadanta.....	57
5.6	Valunta.....	58
5.6.1	Horton	59
5.6.2	Green ja Ampt.....	60
5.6.3	Rationaalinen menetelmä	60
5.6.4	SCS.....	61
5.6.5	Yksikkövaluntakäyrä	62
5.6.6	Pintavalunta SWMM-mallissa.....	64
5.6.7	HEC-1	66
5.7	Painovoiman vaikutus virtausolotiloihin	67
5.8	Viskositeetin vaikutus virtausolotiloihin	68
5.9	Hydraulinen laskenta	69
5.9.1	Saint Venantin yhtälö eli dynaaminen aaltoyhtälö	69
5.9.2	Kinemaattinen aaltoyhtälö.....	70
5.9.3	Stationäärinen eli pysyvä virtaus (steady flow).....	71
5.9.4	Convex-menetelmä	71
5.10	Valunta-aika	72
5.11	Paikallishäviöt hydraulisessa laskennassa	74
5.11.1	Yleinen ja geneerinen häviökaava	75
5.11.2	HEC-22.....	75
5.11.3	AASHTO.....	75
5.12	Lähtötietojen tarkkuus	76
6.	MENETELMÄT	77
6.1	Mallinnusohjelmat	77
6.2	Ohjelmien perusominaisuudet	77
6.3	Hydraulinen laskenta	79
6.4	Mallin rakentaminen.....	83
6.4.1	Ohjelma A	83
6.4.2	Ohjelma B.....	85
6.5	Mallinnustilanteet	88
6.6	Mallinnustilanne 1: uuden alueen kaavoitus	88
6.7	Mallinnustilanne 2: rakennetun alueen kapasiteetti.....	91
6.8	Ohjelmien vertailussa käytettävät laskentaominaisuudet	95
6.9	Viivytystarve EIA:n perusteella	95

7.	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	96
7.1	Ohjeistus ohjelmien käyttöön.....	96
7.2	Ohjelmien ominaisuuksien vertailu	96
7.2.1	Mallin rakentaminen	97
7.2.2	Tietojen syöttö rakennettuun malliin	97
7.2.3	Syötetyn tiedon muuttaminen.....	97
7.2.4	Sadetiedot	98
7.2.5	Hydraulinen laskenta.....	99
7.2.6	Aika-askeleen pituus ja laskenta-aika	100
7.2.7	Määrällisen ja laadullisen hallinnan työkalut	100
7.2.8	Viivytysrakenne	102
7.2.9	Kaivojen nielu- ja purkuhäviöt	103
7.2.10	Mallinnettavat tilanteet.....	105
7.2.11	Mallinnettavien tilanteiden vertailu	106
7.2.12	Useampi purkuputki kaivosta	107
7.2.13	Tulosten esittäminen	107
7.2.14	Tulosten vertailu	107
7.2.15	Tiedon siirto.....	108
7.3	Mallinnustilanteen 1 tulokset (Kylänpää).....	110
7.3.1	Osavaluma-alueilta muodostuvat hulevesivirtaamat	110
7.3.2	Viivytysrakenteet	112
7.3.3	Herkkyystarkastelu	113
7.3.4	Viivytystarve EIA-menetelmällä	116
7.4	Mallinnustilanteen 2 tulokset (Rajamäki).....	117
7.4.1	Tehokas sadanta.....	117
7.4.2	Valuma-alueilta purkautuva huippuvirtaama	119
7.4.3	Virtaamat verkostossa	120
7.4.4	Viivytysrakenne	122
7.4.5	Herkkyystarkastelu	123
7.4.6	Viivytystarve EIA-menetelmällä	124
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET	127
	LÄHTEET.....	130

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AASHTO	The American Association of State Highway and Transportation officials. Julkaissut hulevesien hallinnan ohjeistuksen, joka tunnetaan AASHTO nimellä.
AVI	Aluehallintovirasto
C	Valuntakerroin, joka kuvaa huleveden osuutta sateesta. Valuntaker-toimessa on huomioitu erialaisia häviöitä, kuten imeytyminen maa-han, haihtuminen ja pidähtyminen pinnan painanteisiin.
CDS	Chicago Design Storm. Mitoitussade, jossa sateen intensiteetti muuttuu ajan suhteen (intensiteettihiippu sateen keskellä).
CN	Curve Number eli käyränumero. Kuvaa maaperän ominaisuutta SCS:n hulevesien hallintamenetelmissä
EIA	Tehoisa eli kuivatusjärjestelmään yhdistetty osuus valuma-alueen läpäisemättömästä pinnasta.
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
FHWA	Federal Highway Administration. Liittovaltion tiehallinto USA:ssa.
HEC-1	U.S. Hydrology Engineering Center (HEC) of Army Corps of En-gineers kehittämä mallinnusohjelma.
HEC-22	Hydraulic Engineerin Circular No 22 -menetelmäksi kutsuttu Yh-dysvaltalainen, tiehallinnon (FHWA) julkaisema suunnitteluohjeis-tus. Sisältää mm. paikallishäviöiden arviointimenetelmän.
IUH	Instant Unit Hydrograph. Välittömästi valuma-alueelta purkautuva valuntakäyrä (hydrografi).
MRL	Maankäyttö- ja rakennuslaki
MRM	Modified rational method eli sovellus rationaalisesta menetelmästä, joka mahdollistaa virtaamakäyrän laadinnan purkupisteessä.
NRCS	Natural Resources Conservation Services
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma.
RM	Rationaalinen menetelmä. Määrittää valuma-alueelta muodostuvan huippuvirtaaman valumakertoimen avulla.

SCS	Soil Conservation Service:n kehittämä valunnan arviointimenetelmä, joka perustuu empiirisiin, Yhdysvalloissa tehtyihin tutkimuksiin.
SWMM	Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston (U.S. EPA) kehittämä ja julkaisema hulevesien hallintaohjelmisto Storm Water Management Model.
T_c	Valunta-aika (time of concentration), joka kaukaisimpaan osaan osavaluma-aluetta sataneelta vedeltä kestää virrata tarkastelupisteseen.
TIA	Läpäisemättömän pinnan osuus valuma-alueesta (total impervious area).
TR-20	Technical Release 20 -menetelmä. SCS-menetelmästä tehty mallinnusohjelma suuremmille valuma-alueille.
TR-55	Technical Release 55 -menetelmä. SCS-menetelmästä tehty graafinen sovellus ja mallinnusohjelma pienille valuma-alueille.

1. JOHDANTO

Vuonna 2003 Suomen pinta-alasta alle kaksi prosenttia oli taajaan asuttua, ja taajamissa asui 80 prosenttia koko maan väestöstä. Asutuksen keskittyminen taajamiin on ollut voimakkainta 1980-luvulla ja kolmasosa taajamien pinta-alasta on rakennettu vuosien 1980-2000 välisenä aikana. (Ristimäki et al. 2003). Saarisen (2011) mukaan taajamien määrä on vähentynyt, kun suomalaiset ovat muuttaneet taajamista kaupunkeihin ja kasvukeskukset ovat sulauttaneet läheiset taajamat itseensä. Ilmastonmuutoksen hillintä ja kuntien kasvavat kustannukset tulevat tiivistämään yhdyskuntarakennetta edelleen.

Asutuksen keskittyessä läpäisemättömän maapinnan osuus on kasvanut, mikä on vaikuttanut muodostuviin hulevesimääriin. Aina 2000-luvulle saakka taajama-alueiden hulevesien hallinta Suomessa on koostunut lähinnä hulevesien tehokkaasta johtamisesta eteenpäin. Taajamien laajentuessa ja tiivistyessä, hulevesien aiheuttamiin haittavaikutuksiin on havahduttu. Hulevesien hallinta taajama-alueilla siirrettiin kunnan vastuulle maankäyttö- ja rakennuslain päivityksen yhteydessä elokuussa 2014.

Hulevesien hallinnan tavoitteiden, mitoituksen ja suunnittelun uusimmat ohjeet ovat Kuntaliiton (2012) hulevesioppaassa sekä Liikenneviraston ohjeessa 05/2013 teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Ohjeistus perustuu riskinarviointiin ja on suurimmaksi osaksi ohjeellista. Mitoituksessa käytettävät arvot pohjautuvat ulkomaisiin tutkimuksiin, jotka eivät välttämättä vastaa Suomen olosuhteita. (Sillanpää 2013). Hulevesioppaassa kehoitetaan käyttämään mallinnusta hulevesien hallinnan suunnittelussa, mutta varsinaisen mitoituksen ohjeistus on annettu käsin tehtävälle laskennalle.

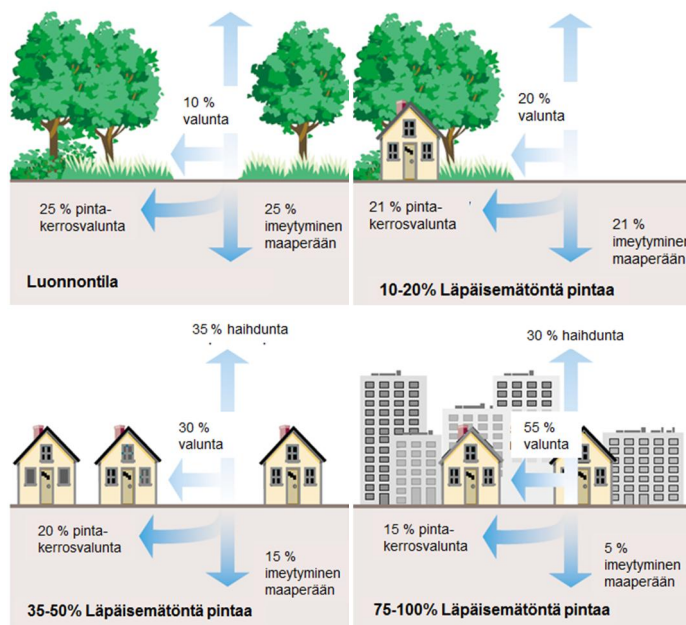
Tässä työssä on koottu yhteen pääperiaatteet hulevesien hallinnasta, mitoituksesta, vastuista ja velvollisuuksista. Työssä on kartoitettu hulevesien mallinnuksen perusteita, käytössä olevia laskentamenetelmiä sekä valintoja, joita mallinnusta aloittaessa tehdään. Tässä työssä verrataan kahta kaupallista mallinnusohjelmaa, joissa molemmissa on hulevesien määrään ja hallintaan soveltuvia ominaisuuksia. Työssä esitetyt laskentamenetelmät on valittu mallinnusohjelmien ominaisuuksien perusteella. Kaikkia ohjelmien eri laskentamenetelmiä ja ominaisuuksia ei ole esitetty.

Teoreettisen vertailun lisäksi mallinnusohjelmia on verrattu käytettävyyden ja toimintojen suhteen kahdessa mallinnustilanteessa. Ensimmäinen mallinnustilanne liittyy uuden alueen kaavoittamiseen ja toinen katualueen uudistamisen yhteydessä tehtävään kuivatusjärjestelyiden uusintaan. Molemmat mallinnustilanteet sijaitsevat Nurmijärven Rajamäellä.

2. HULEVESIEN HALLINNAN PERUSTEET

Maankäyttö- ja rakennuslain (MRL) mukaan hulevedet ovat rakennetulla alueella maan pinnalle, rakennuksen katolle tai muulle pinnalle kertyviä sade- tai sulamisvesiä. Hulevesien hallinnalla tarkoitetaan hulevesien imeyttämiseen, viivyttämiseen, johtamiseen, viemärointiin ja käsittelyyn liittyviä toimenpiteitä. Hulevesien hallinnan yleinen tavoite on kehittää hulevesien suunnitelmallista hallintaa erityisesti asemakaava-alueella, imeyttää ja viivyttää hulevesiä niiden kerääntymispaikalla, ehkäistä hulevesistä aiheutuvia haittoja ja vahinkoja sekä vähentää hulevesien johtamista viemäriin. (MRL 1999).

Veden luonnollisessa kiertokulussa huomattava osuus sadevedestä imeytyy maaperään pohjavedeksi, osa vedestä valuu hitaasti maan pinnalla tai maakerroksissa kohti vesistöjä ja loput haihtuvat ilmaan. Kaupunkimainen rakentaminen estää veden luonnontilaisen kierron. Lämpäsemättömät pinnat, kuten katot ja kadut, estävät suoran imeytyminen maaperään (FISRWG 1998, Kuntaliitto 2012). Rakenteiden kestämistä parannetaan kuivatusjärjestelyillä, jotka johtavat pinnoille satavan veden tehokkaasti eteenpäin pienentäen haihduntaa. (Liikennevirasto 2013, Kuntaliitto 2012). Lämpäsemättömän pinnan osuuden vaikutus pintavalunnan muodostumiseen on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lämpäsemättömän päällysteen määrän vaikutus pintavaluntaan. (Mukailtu: FISRWG 1998)

Taajamissa tulvat ovat yleistyneet taajama-alueiden kasvaessa ja tiivistyessä. Avo-ojiin perustuneita kuivatusratkaisuja on korvattu hulevesiviemäreillä katutilan siistimiseksi ja

hyötypinta-alan kasvattamiseksi. Vanhojen alueiden täydennysrakentaminen on lisännyt olemassa olevien hulevesijärjestelmien kuormitusta. Lisäksi rakentamattomia alueita, jotka ovat aikaisemmin toimineet luontaisina pintavalunnan varastoalueena, on otettu hyötykäyttöön. Viivytyskapasiteetin pienentyminen, hulevesijärjestelmän kapasiteetin riittämättömyys, puutteellinen kunnossapito ja tavanomaista suuremmat sademäärät ovat eräitä syitä tulvien syntyyn ja tulvista aiheutuvien vahinkojen kasvuun. (Kuntaliitto 2012).

Hulevesien aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin, kuten tulviin, eroosioon ja hulevesien aiheuttamaan vesistökuormitukseen on alettu kiinnittää huomiota. Hulevesien hallinta edellyttää kokonaisvaltaista suunnittelua ja hulevesien huomiointia niin kaavoituksessa, alueiden rakentamisessa kuin kunnossapidossa. Kuntaliiton laatiman hulevesioppaan (2012) mukaan hulevesien hallinnan yleisiksi periaatteiksi ovat priorisoituneet:

- hulevesien muodostumisen estäminen
- hulevesien määrän vähentäminen (käsittely ja hyödyntäminen syntypaikalla)
- johtaminen suodattavalla ja hidastavalla järjestelmällä
- johtaminen yleisillä alueilla oleville hidastus- ja viivytysalueille
- johtaminen purkuvesiin tai pois alueelta.

2.1 Hulevesien hallinnan vastuut ja määräykset

Elokuussa 2014 maankäyttö- ja rakennuslakiin (132/1999) liitettiin hulevesiä koskevat erityiset säännökset. Samalla vesihuoltolaki (119/2001) päivitettiin vastaamaan maankäyttö- ja rakennuslain muutoksia. Uudet määräykset ovat astuneet voimaan syyskuussa 2014.

Hulevesiin liittyviä keskeisiä lakeja ja asetuksia ovat maankäyttö- ja rakennusasetus (132/1999), vesilaki (587/2011) ja laki tulvariskien hallinnasta eli tulvariskilaki (620/2010) ja -asetus (659/2010). Tulvariskilaki pohjautuu Euroopan Unionin direktiiviin tulvien arvioinnista ja hallinnasta.

Muita hulevesiin liittyviä lakeja ovat laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä eli vesienhoitolaki (1299/2004), ympäristönsuojelulaki (86/2000), luonnonsuojelulaki (1096/1996), laki kadun ja eräiden yleisten alueiden kunnossa- ja puhtaanapidosta (669/1978), maantielaki (503/2005) ja ratalaki (110/2007). Vesienhoitolaki pohjautuu Euroopan Unionin vesipuitedirektiiviin (2000/60/EY). Vesienhoitolakia on täydennetty valtioneuvoston asetuksella (1040/2006).

Maankäyttö- ja rakennuslakia tarkemmat rakentamista koskevat säännökset ja ohjeet on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan.

2.1.1 ELY-keskuksen vastuut ja velvollisuudet

Tulvariskien hallintaa koskevan lain (620/2010) mukaan ELY-keskus (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus) tekee vesistöalueiden ja merenrannikon tulvariskien alustavat arvioinnit, laatii tulvavaara- ja tulvariskikartat sekä valmistelee ehdotukset vesistöalueiden ja merenrannikon tulvariskien hallintasuunnitelmiksi. Tulvavaarakartassa esittää veden alle jäävät alueet sekä vedenkorkeudet tietyllä tulvan todennäköisyydellä. Tulvariskikarttaan on koottu tietyllä todennäköisyydellä esiintyvän tulvan haitan suuruus, kuten vahingolliset seuraukset ihmisten terveydelle ja turvallisuudelle, veden- ja sähkönjakelun toimintakyvyille, sekä haitat ympäristölle. Tulvariskien hallintasuunnitelmassa laaditaan toimenpiteitä, joilla voidaan vähentää tulvien todennäköisyyttä, vähentää tulvimisesta aiheutuvia riskejä sekä parantaa varautumista ja laatia toimintasuunnitelmia tulvimistilanteita varten.

ELY-keskus avustaa kuntia hulevesitulvariskien alustavassa arvioinnissa, merkittävien tulvariskialueiden nimeämisessä ja tulvariskien hallintasuunnitelmien laatimisessa (Tulvariskilaki 2010).

Vesienhoitoasetuksen (1040/2006) mukaan ELY-keskus luokittelee pinta- ja pohjavedet, huolehtii vesienhoitosuunnitelmaa varten laadittavien selvitysten ja toimenpideohjelman laadinnasta sekä kokoaa ehdotuksen vesienhoitosuunnitelmaksi ja laatii seurantaohjelman. Vesienhoitosuunnitelmassa voidaan antaa hulevesien johtamiseen vaikuttavia tavoitteita ja toimintaohjeita alueille, joilla hulevesien osuus pintavesien kuormittajana on merkittävä ja vesien tilaa on tarpeen parantaa (Ympäristöministeriö 2007).

2.1.2 Kunnan vastuut ja velvollisuudet

Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) mukaan kunta vastaa hulevesien hallinnan järjestämisestä asemakaava-alueella. Halutessaan kunta voi vastata myös muiden alueiden hulevesien hallinnan järjestämisestä.

Kunnan tulee tarvittaessa ryhtyä toimenpiteisiin kunnan hulevesijärjestelmän ja vesihuoltolaitoksen hulevesiviemäriverkoston toteuttamiseksi. Hulevesijärjestelmä tulee toteuttaa asemakaavan mukaista maankäyttöä vastaavasti. Kustannukset eivät saa muodostua kohtuuttomaksi kunnalle, kiinteistön omistajalle tai haltijalle. (MRL 1999).

Kunta ja vesihuoltolaitos voivat sopia, että vesihuoltolaitos vastaa huleveden viemäroinnistä määrätyillä alueilla. (Vesihuoltolaki 2001). Kunnan hulevesijärjestelmä sisältää hulevesien hallintaan tarkoitettujen alueiden ja rakenteiden kokonaisuuden lukuun ottamatta em. vesihuoltolaitoksen hulevesiviemäriverkostoja. (MRL 1999).

Hulevesien hallinnalle voidaan antaa määräyksiä oikeusvaikutteisessa yleiskaavassa tai asemakaavassa. Kaavamääräysten lisäksi kunnan määräämä monijäseninen toimielin

voi antaa kuntaa tai kunnan osaa koskevia hulevesimääräyksiä. Määräysten valmistelussa ja laatimisessa noudatetaan samoja säädöksiä kuin rakennusjärjestyksen valmistelussa ja laatimisessa. Määräykset voivat liittyä kiinteistöltä johdettavien hulevesien määrään, laatuun, maahan imeyttämiseen, viivyttämiseen, tarkkailuun, käsittelyyn ja hulevesijärjestelmään liittymisen suhteen. Hulevesimääräyksiä ei sovelleta, jos ne ovat em. kaavojen vastaisia. (MRL 1999).

Hulevesisuunnitelma on katusuunnitelmaan verrattava detaljisuunnitelma, jossa esitetään hulevesien hallinnan ratkaisut ja rakenteet, kuten esimerkiksi imeytysalueet, koskeikot, ojat, valumavesien reitit, putket ja pumppaamot. Hulevesisuunnitelma on oltava asemakaavan mukainen ja vastattava kaavan mukaisia maankäytön tarpeita. Suunnitelman laadinnassa on huomioitava katusuunnitelma ja yleisten alueiden suunnitelma. Hulevesisuunnitelman tulee täyttää toimivuuden, turvallisuuden ja viihtyisyyden vaatimukset myös sademäärän ja rankkasateiden lisääntyessä. Usein kunnan katusuunnitelmassa on esitetty hulevesijärjestelmän rakenteet, eikä erilliselle suunnitelmalle ole tarvetta. Hulevesisuunnitelman laadinnassa on noudatettavaa samaa vuorovaikutustapaa kuin kaavaa valmisteltaessa. Kunta hyväksyy hulevesisuunnitelman tarvittaessa. (MRL 1999).

Naapurin kiinteistöltä valuvien hulevesien aiheuttama haitta voidaan ratkaista kunnan määräämän monijäsenisen toimielimen päätöksellä. Haitan poistamiseksi usea kiinteistö voidaan määrätä toteuttamaan yhteisiä hulevesijärjestelyitä. (MRL 1999).

Kunta voi periä vuosittaista hulevesimaksua kattamaan hulevesijärjestelmästä kunnalle aiheutuneita kustannuksia. Maksua voi periä hulevesijärjestelmän vaikutusalueella sijaitsevien kiinteistöjen omistajilta tai haltijoita. Vaikutusalue ei edellytä kiinteistön konkreettista liittymistä hulevesijärjestelmään. Esimerkiksi katujen kuivatusjärjestelmät palvelevat monia kiinteistöjä ilman liittymistä kadun kuivatusrakenteisiin. (MRL 1999).

Kunnan viranomaisen osoittaa kiinteistön hulevesijärjestelmän ja kunnan hulevesijärjestelmän yhteensovittamiseksi tarpeelliset rajakohdat ja antaa hulevesien johtamiseen liittyviä määräyksiä (MRL 1999). Hulevesiin sovelletaan maankäyttö- ja rakennuslain mukaisia pykälä uhkasakosta ja teettämisuudesta (182 §), tarkastusoikeudesta (183 §) sekä muutoksenhausta (190 §).

Tulvariskien hallintaa koskevan lain (620/2010) mukaan kunta vastaa myös hulevesitulvariskien hallinnan suunnittelusta. Hulevesitulvariskien hallintaa varten kunta laatii:

- alustavan arvioinnin hulevesitulvien riskeistä
- tulvavaarakartat ja tulvariskikartat
- nimeää merkittävät tulvariskialueet sekä
- laatii ja hyväksyy nimetyille tulvariskialueille tulvariskien hallintasuunnitelman.

2.1.3 Kiinteistön omistajan vastuut ja velvollisuudet

Kiinteistön hulevesien hallinnasta vastaa kiinteistön omistaja tai haltija. Muodostuvat hulevedet johdetaan kunnan hulevesijärjestelmään, jos hulevesiä ei voida hoitaa kiinteistöllä esimerkiksi imeyttämällä tai jos hulevesiä ei voida johtaa vesihuoltolaitoksen hulevesiviemäriverkostoon. Kiinteistön omistaja tai haltija voi hakea vapautusta liittymisestä, jos hulevesistä voidaan huolehtia asianmukaisesti muilla toimenpiteillä. (MRL 1999).

Kiinteistökohtainen järjestelmä on toteutettava yhteensopivaksi kunnan hulevesijärjestelmän kanssa. Järjestelmän laitteiden ja rakenteiden on sovelluttava käyttötarkoitukseensa ja ylläpidettävä terveellisiä ja turvallisia olosuhteita. (MRL 1999).

Kiinteistön omistaja tai haltija vastaa kiinteistönsä hulevesijärjestelmästä, sen laitteistosta ja rakenteista kunnan viranomaisen osoittamaan rajakohtaan (liittymäkohtaan) asti. Tontin tai kiinteistön omistaja ja haltija on velvollinen sallimaan hulevesisuunnitelmasta aiheutuvien töiden suorittamisen alueellaan (MRL 1999).

2.2 Hulevesien yhteys muuhun suunnitteluun

Hulevesien hallinta on yhdistetty maankäyttö- ja rakennuslain päivityksen myötä osaksi kaavoitusta. Pintojen ja rakenteiden kuivatus on osa teiden, katujen ja rakennusten suunnittelua. Hulevesien tehokkaat johtamisreitit vaikuttavat hulevesivirtaaman muodon kautta vastaanottavan uoman tai vesistön vesiolosuhteisiin. Hulevesien johtaminen pohjavesialueen ulkopuolelle vaikuttaa pohjaveden muodostumisen kautta vedenhankintaan. Koska hulevedet voivat kuljettaa mukanaan haitta-aineita, liittyvät hulevedet myös pinta- ja pohjavesien laadulliseen suojeluun. Merkittävimpiä liittymiskohtia on esitetty tarkemmin seuraavissa luvuissa.

2.2.1 Kaavoitus

Kunnan tehtävä on ohjata alueiden käytön suunnittelun kautta rakentamista ja luoda edellytykset hyvälle elinympäristölle ja kestäväälle kehitykselle. Kaavoituksella voidaan muun muassa ohjata alueelle suunniteltavia toimintoja, vaikuttaa rakentamisen tehokkuuteen ja sijoittamiseen, varata alueita sekä antaa määräyksiä rakentamiselle. Kunnissa maankäytön suunnittelusta vastaa pätevä kaavoittaja (MRL 1999).

Kaavan tulee perustua riittäviin tutkimuksiin ja selvityksiin alueelta, jolla kaavalla voidaan arvioida olevan olennaisia vaikutuksia. Kaavoituksessa on huomioitava valtioneuvoston asettamat valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet, jotka ohjaavat maakuntien ja kuntien kaavoitusta sekä valtion viranomaisten toimintaa. (MRL 1999). Valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet (2008) sisältävät mm. tulvariskien hallintaan ja vesiensuojeluun liittyviä tavoitteita.

Kaavoituksessa on huomioitava soveltuvien osien vesienhoitosuunnitelmissa ja vesienhoidon toimenpideohjelmassa annetut ohjauskeinot, jotka voivat liittyä hulevesien johtamiseen, käsittelyn kehittämiseen sekä hulevesien hallinnan suunnitteluun. Vesienhoitosuunnitelmat ja toimenpideohjelmat ovat ELY-keskuksen valmistelemissa ja valtioneuvoston hyväksymiä ohjauskeinoja pinta- ja pohjavesien hyvän tilan ylläpitämiseksi. (Vesienhoitolaki 2004).

Hulevesien huomioiminen kaavoituksessa edellyttää valuma-alueelähtöistä tarkastelua yleiskaavoituksesta alueiden yksityiskohtaiseen kaavoituksesta aina toteutukseen saakka. Hulevesien käsittelyn edellyttämä tilavaraus vaatii orientoitumista piha-alueiden ja viheralueiden suunnitteluun. (Tornivaara-Ruikka, 2006). Pintavesien ja virtausolosuhteiden huomioiminen ei ole uusi kaavoituksen vaatimus. Jo vuoden 1986 seutusuunnittelun keskusliiton ohjeissa on neuvottu kartoittamaan mm. pintavedet, virtausolosuhteet, sadanta ja topografia. (Yleiskaavan sisältö ja esitystavat 2006).

Ympäristöministeriön laatimassa asemakaavamerkinnot ja -määräykset -oppaassa (2003) ei ole annettu hulevesien hallintaan liittyviä määräyksiä tai merkintöjä. Ohjeistuksen puuttuessa kunnat ovat määritelleet itse omat hulevesien hallinnan kaavamerkinnot (Kuntaliitto 2012).

Maakuntakaava on yleispiirteisin kaavoista. Maakuntakaavassa esitetään maakunnassa tai sen osa-alueilla alueiden käytön ja yhdyskuntarakenteen kehittämisen periaatteet. Maakuntakaavan tehtävänä on yhdistää valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet maakunnan alue- ja yhdyskuntarakenteeseen huomioiden maakunnan omat erityispiirteet. Maakuntakaavan laatii maakunnan liitto, sen hyväksyy maakunnan liiton liittovaltuusto ja vahvistaa ympäristöministeriö. (MRL 1999). Maakuntakaavoituksen yhteydessä tehdään yleispiirteinen hulevesien merkityksen arviointi osana tulvien hallintaa, sekä pinta- ja pohjavesien tilan turvaamista (Kuntaliitto 2012).

Kunnan alueiden käytön ohjaamiseksi laaditaan yleiskaavoja ja asemakaavoja. **Yleiskaavassa** osoitetaan alueiden käytön pääpiirteet kunnassa. Yleiskaavassa voidaan antaa määräyksiä (yleiskaavamääräykset) maankäytön ja rakentamisen ohjaamista varten tietyillä alueilla sekä haitallisten ympäristövaikutusten estämistä tai rajoittamista. Yleiskaavassa sovitetaan maakuntakaavassa määritellyjä valtakunnallisia ja maakunnallisia alueiden käytön tavoitteita kunnan omiin tavoitteisiin. Kunnan yleiskaavan tai osayleiskaavan hyväksyy kunnanvaltuusto. Useamman kunnan yhteisen yleiskaavan hyväksyy kuntien yhteinen toimielin ja sen vahvistaa ympäristöministeriö. (MRL 1999).

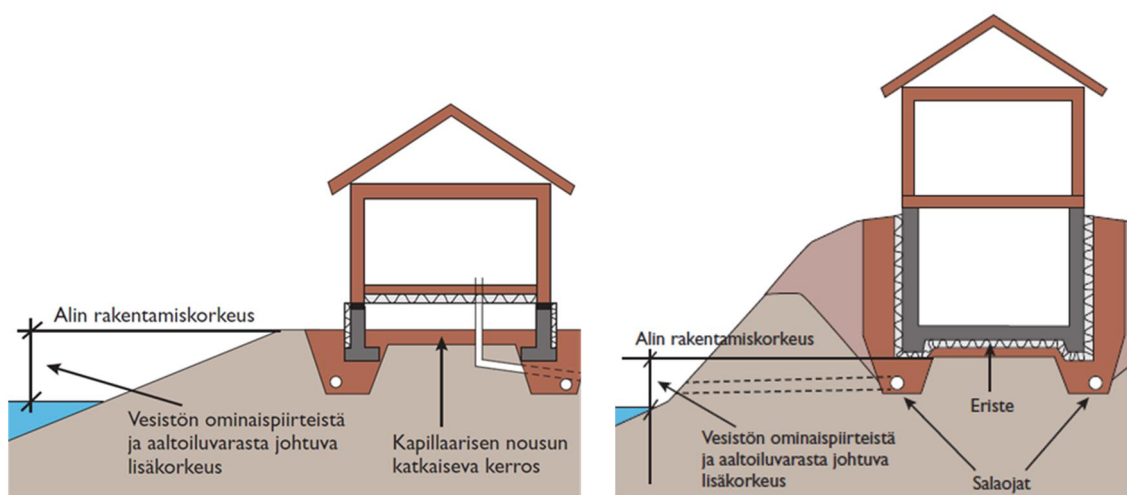
Yleiskaavaa varten tehdään suunnittelun lähtökohtien ja tavoitteiden määrittämiseksi perusselvityksiä ja kaavan toteuttamisen vaikutusselvityksiä. Selvitysten perusteella on pystyttävä arvioimaan, ettei ehdotettu ratkaisu aiheuta merkittäviä haitallisia vaikutuksia. Yleiskaavaa varten selvitetään mm. pohjavesialueiden ominaisuudet, luonto- ja

maisemaselvitykset, pohjavesialueiden pilaantumisriskit, pienvesistöjen tila, tulvariskit, hulevesien käsittelytarve. (Yleiskaavan sisältö- ja esitystavat 2006).

Kaavoitusta varten tehdään yleispiirteinen hulevesiselvitys, jossa esitetään valuma-aluekohtaiset hulevesien hallinnan tavoitteet. Hulevesien johtaminen ja periaatteet hulevesien käsittelystä esitetään yleiskaavakartoissa ja kaavamääräyksissä. (Ilmastokestävän kaupungin suunnitteluopas 2015b). Yleiskaavatasolla hulevesien hallinta tarkoittaa käytännössä tilavarauksia hulevesien käsittelyä ja johtamista varten. Yleensä hulevesialueet merkitään osaksi viheralueita. (Kuntaliitto 2012). Oikeusvaikutteisessa osayleiskaavassa voidaan antaa määräyksiä hulevesien hallinnalle (MRL 1999).

Asemakaavassa osoitetaan kunnan osa-alueen käytön ja rakentamisen järjestäminen. Asemakaavaa valmistellessa tarkennetaan aiemmissa kaavoitusvaiheissa tehtyjä selvityksiä. Koska kunta vastaa asemakaava-alueella hulevesijärjestelmän toteuttamisesta asemakaavan tarpeita vastaavasti, tulee hulevesijärjestelmien vaatimukset huomioida kaavoituksessa. Asemakaavoituksessa esitetään hulevesien hallintajärjestelmän rakenteet ja ratkaisut. Asemakaavan hyväksyy kunnanvaltuusto (MRL 1999).

Tulvimisen vaikutuksiin voidaan vaikuttaa kaavamääräyksillä, alimmalla sallitulla rakentamiskorkeudella ja matalille alueille suunnitellun maankäytön valinnalla. Alin suositeltava rakentamiskorkeus tarkoittaa korkeustasoa, jonka alapuolelle ei tule sijoittaa kastuessa vaurioituvia rakenteita. Esimerkki alimmasta rakentamiskorkeudesta on esitetty kuvassa 2. (Parjanne & Huokuna 2014).



Kuva 2. Alin rakentamiskorkeus sokkeliperustukselle (vasemmalla) ja maanvaraiselle rakennukselle (oikealla). Kuvassa esitetty vedenpinnankorkeus on tulvakorkeus. (Parjanne & Huokuna 2014).

Rakentamistapaohjeessa voidaan havainnollistaa kaavan toteuttamisen keskeisiä periaatteita. Rakentamistapaohjeilla ei kuitenkaan ole oikeudellista vaikutusta. (Asemakaava-merkinnät ja -määräykset 2003). Rakentamistapaohje voi esimerkiksi sisältää kuvauksen tonttien hulevesien hallintavaihtoehtoista.

2.2.2 Pohjaveden ja pintavesien suojeleminen

Pohjaveden suojelemiseksi vesilain (2011) on säädetty pohjaveden muuttamis- ja pilaamiskielto. Käytännössä kiellot estävät toimenpiteet, jotka vähentävät pohjaveden muodostumista tai heikentävät sen laatua.

Pohjaveden suojeleminen liittyy pilaamis- ja muuttamiskiellon kautta hulevesien hallintaan. Pohjaveden muodostuminen estyy, jos hulevedet johdetaan pois pohjaveden muodostumisalueelta. Haitta-aineita sisältävän huleveden imeytyminen maahan voi puolestaan aiheuttaa pohjavesiesiintymän pilaantumiseen. (Kuntaliitto 2012).

Hulevedelle ei ole asetettu yleisiä laatuvaatimuksia tai -kriteerejä mikä hankaloittaa hulevesistä aiheutuvien riskien arviointia ja hallintaa (Särkiaho & Sillanpää 2012). Valtanen et al. (2010) on kerännyt koosteen erilaisten maankäyttömuotojen hulevesien haitta-aineista (taulukko 1).

Taulukko 1. *Hulevesiin kertyviä haitta-aineita maankäyttömuodoittain. Valtanen et al. 2010 tekemä koonti lähteistä: Massachusetts Department of Environmental Protection and Massachusetts Office of Coastal Zone Management 1997, House ym. 1993, D’Arcy ym. 2000, Moy ym. 2000.*

Haitta-aine	ilmakehä	liikenne	teollisuus	katto-rakenteet	asutus	rakennus-työmaa	nurmialue
Typpi	x	x	x		x	x	x
Fosfori	x	x	x		x	x	x
Sulfaatti	x	x					
Rikin oksidit	x	x					
Kloridi	x	x					
Metallit	x	x	x	x	x		
PAH-yhdisteet	x	x	x		x		
VOC-yhdisteet		x	x				
Öljyt ja hiilivedyt		x	x		x	x	
Pestisidit					x		x
Koliformiset bakteerit					x		x
Kiintoaine	x	x	x		x	x	x

Yleisimpiä hulevesien sisältämiä haitta-aineita ovat kiintoaine, ravinteet ja metallit. Suurin osa haitta-aineista on yleensä sitoutunut kiintoaineeseen. (Kuntaliitto 2012).

Pohjaveden suojelemiseksi kaavoituksen yhteydessä määritellään pinnat (esim. teollisuuskorttelit, kadut, pysäköintialueet), joilta hulevedet johdetaan pohjavesialueen ulkopuolelle pohjaveden pilaamiskiellon vuoksi. Samalla määritetään, paljonko kaavoituksen mukainen rakentaminen vähentää pohjaveden muodostumista. (Kuntaliitto 2012). Jos vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesiesiintymän antoisuutta tai käyttökel-

poisuutta vähennetään oleellisesti, on hankkeella oltava AVI:n (Aluehallintovirasto) lupa (VL 2011).

Hulevesioppaassa (Kuntaliitto 2012) on esitetty erilaisille maankäyttömuodoille hulevesien hallintaratkaisuja I- ja II-luokan pohjavesialueilla (taulukko 2). Hallintaratkaisuissa on huomioitu hulevesien mahdollinen käsittely niin ettei hulevedet aiheuta pohjaveden pilaantumista.

Taulukko 2. *Hulevesien hallintavaihtoehtoja I- ja II-luokan pohjavesialueella (Kuntaliitto 2012). Taulukossa poisjohtaminen tarkoittaa että hulevedet johdetaan pois pohjavesialueelta.*

Maankäyttö	Hallintaratkaisu
Vilkkaasti liikennöity katu- tai tiealue	(hiekan- ja öljynerotuskaivo) + käsittely esim. biopidätysalueella pohjavesisuojaus + hulevesien poisjohtaminen suodatus + pohjavesisuojaus viherkaista / suojaviheraluekäsittely
Katu- tai tiealue, laaja pysäköintialue	poisjohtaminen suodatus + pohjavesisuojaus viherkaista- / suojaviheraluekäsittely
Piha, korttelimittakaavan pysäköintialue, sivukadut	suodatus, käsittely hulevesiaiheessa
Varastojen lastausalue (suuri haitta-aineriski)	pohjavesisuojaus + poisjohtaminen esikäsittely + johtaminen hulevesiviemäriin
Tori, kevyenliikenteenalue	suodatus + imeyttäminen imeyttäminen
Huoltamoiden piha	(esikäsittely+) pohjavesisuojaus + poisjohtaminen esikäsittely + viemäröinti
Teollisuusalue, urheilu-alue	poisjohtaminen + käsittely pv-alueen ulkopuolella käsittely + imeytys
Taajaman keskusta, asuinalue	imeytys käsittely
Lumenkaatopaikka	(hiekan- ja öljynerotuskaivo) + käsittely esim. biopidätysalueella
Katot + muut ”puhtaat” pinnat (lumi + vesi)	imeyttäminen

Pintavesissä hulevedet voivat aiheuttaa hetkellisen kuormituksen vuoksi akuutin laatuhäiriön. Pitkään jatkuva kuormitus aiheuttaa kroonisia vaikutuksia, kuten vesistöjen rehevöitymistä tai samentumista. Hulevesien aiheuttamat vaikutukset ovat yleensä kroonisia. (Valtanen et al. 2010).

Hulevesien vaikutus pienvesien kuten purojen, lampien ja pienten järvien tilaan on kasvanut hulevesivirtaamien ääri-ilmiöiden myötä. Suurilla virtaamilla uomien eroosio voi kasvaa heikentäen rantojen rakennetta ja ekologista tilaa. Kuivina hetkinä virtaama uomassa voi olla vesieliöille liian matala. Pintavesien tilan parantamisessa pääpaino on hulevesien kiintoaineen poistamisessa, virtaaman tasaamisessa ja luonnonmukaisen uomaprofiilin palauttamisessa. (Kuntaliitto 2012).

Suomessa hulevedet johdetaan yleensä käsittelemättömänä luontoon. Hulevesien käsittelytoimenpiteet perustuvat kunnan viranomaisten harkintaan. Käsittelytarpeen arviointi perustuu vastaanottavan vesistön ominaisuuksiin, havaittuihin tai arvioituihin haittavaikutuksiin sekä eri haittavaikutusten ehkäisemisen tärkeysjärjestykseen. Ympäristölupien yhteydessä on voitu antaa myös hulevesiä koskevia velvoitteita. (Kuntaliitto 2012).

2.2.3 Rakentaminen

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (1999) määritellään rakentamista koskevat yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset sekä rakentamisen lupamenettely ja viranomaisvalvonta. Tarkemmat säännökset ja ohjeet on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan (RakMK). Asetuksena annetut ja Suomen rakentamismääräyskokoelmaan kootut säännökset ovat velvoittavia, mutta ministeriön antamat ohjeet eivät. Rakentamismääräyskokoelman määräykset koskevat uuden rakennuksen rakentamista. Korjaus- ja muutostöissä määräyksiä sovelletaan tarvittaessa.

Maankäyttö- ja rakennuslain (1999) 103 §:n mukaan kiinteistön omistaja tai haltija vastaa kiinteistön hulevesien hallinnasta. Hulevedet sisältävät lain mukaan myös rakenteiden kuivatusvedet.

Ympäristöministeriön pohjarakenneasetuksen (2014) mukaan pohja- ja maarakenteet on suunniteltava niin, että maasta rakenteisiin siirtyvän kosteuden haitalliset vaikutukset voidaan ehkäistä, sekä välttää maan routimisesta aiheutuvat haitat ja rakenteiden vauriot. Pohjarakennesuunnitelmassa esitetään yleensä rakenteen kuivanapito. (RakMK A2 2002).

Kiinteistöjen sadevesilaitteistoista ja perustusten kuivatusvesilaitteistoista on annettu tarkempia määräyksiä rakennusmääräyskokoelman kohdassa D1 (RakMK D1 2007). Yleinen määräys on, että sadeveden poisto on järjestettävä kiinteistön alueella hyvin toimivalla tavalla, eikä siitä saa aiheutua vahingon- tai tapaturmanvaaraa, tulvimista tai muuta haittaa. Sadevesilaitteisto on mitoittettava siten, että viemäriin johdettava mitoitussadetta vastaava virtaama ei aiheuta viemärin tulvimista.

Luvanvaraisessa rakentamisessa (rakennukset, tilat) pääsuunnittelija vastaa suunnitelmien riittävästä laadusta ja laajuudesta, sekä rakentamiselle asetettujen vaatimusten täyttymisestä. Sadevesijärjestelmien suunnittelu kuuluu vastaavan LVI-suunnittelijan vastuualueeseen, mikäli vastuualuetta ei jaeta pienempiin osiin. Vastaava suunnittelija huolehtii, että suunnitelmat muodostavat keskenään toimivan kokonaisuuden. (RakMK A2 2002).

Paikallisiin olosuhteisiin soveltuvia määräyksiä rakentamisen suhteen annetaan kunnanvaltuuston hyväksymässä rakennusjärjestyksessä (MRL 1999). Rakennusjärjestyksen määräykset voivat koskea esimerkiksi hulevesien johtamista ja käsittelyä tontilla. Ra-

kennusjärjestyksen määräyksiä ei sovelleta, mikäli oikeusvaikutteisessa yleiskaavassa, asemakaavassa tai Suomen rakentamismääräyskokoelmassa asia on määrätty toisin (MRL 1999).

Kunta vastaa katujen suunnittelusta. Katusuunnitelmassa on usein esitetty hulevesijärjestelmän rakenteet, eikä erilliselle hulevesisuunnitelmalle ole tarvetta. (MRL 1999).

Maankäyttö- ja rakennuslain (1999) mukaan kunta on vastuussa rakentamisen ohjauksesta ja valvonnasta alueellaan ja rakentamista varten on oltava rakennuslupa. Rakennuslupia on neljänlaisia: rakennuslupa, toimenpidelupa, purkamislupa ja maisematyölupa sekä näiden lisäksi ilmoitusmenettely. Lupamenettelyllä varmistetaan että hankkeessa noudatetaan rakentamisen säännöksiä ja valvotaan kaavojen toteutumista. Luvan myöntää kunnan viranomainen (MRL 1999). Rakennuslupa-asiakirjoissa vesien käsittely ja sadevesikaivot merkitään asemapiirustukseen. (RakMK A2 2002).

2.2.4 Rakentamisen aikainen hulevesien hallinta

Rakennustyömailta purkautuvat hulevedet voivat sisältää kiintoaineen ja ravinteiden lisäksi rakennustoiminnasta muodostuvia haitta-aineita kuten kiinteitä jätteitä, öljyjä, rasvoja, pesuvesiä ja rakennuskemikaaleja. (EPA 833-F-00-008).

Sillanpään (2013) mukaan rakennustyön vaiheesta riippuen vedenlaatu heikkeni merkittävästi. Rakennustyömaalta huuhtoutuu aluksi enemmän kiintoaine- ja fosforikuormitusta, typpekuormituksen osuuden kasvaessa vasta myöhemmin. Pitoisuudet olivat suurimpia erityisesti kesällä tai keväällä ja auratussa lumessa. Ravinnekuormituksesta osa on ns. lisäkuormitusta (jätevesikontaminaatio, räjäytystyöt yms.) ja osa muodostuu maan kaivamisesta aiheutuvasta eroosiosta.

Pääosa työmaalla tehtävistä töistä edellyttää viranomaislupaa tai lausuntoa. Näissä luvissa ja lausunnoissa voidaan antaa määräyksiä myös työmaa-aikaisien hulevesien käsittelystä, johtamisesta ja laadusta. Työmaalla muodostuvien vesien hallinnasta voidaan antaa määräyksiä kunnan rakennusjärjestyksessä. (Helsingin kaupunki 2013).

Pitkäaikaiset työmaat voivat edellyttää ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan, jos rakentaminen voi aiheutua vesistön pilaantumista. Maankäyttö- ja rakennuslain (1999) mukaisia lupia ovat rakennuslupa (125 §), toimenpidelupa (126 a §) ja maisematyölupa (128 §). Muita lupia ja suostumuksia ovat esimerkiksi kaivulupa yleisellä alueella kaivamiseen, vesien johtaminen hule-, jäte- ja/tai sekaviemäriin ja suostumus vesien johtamiseksi kunnan omistamalle tontille (maaperään/ojaan). Työmaavesien käsittelysuunnitelma voidaan liittää osaksi lupahakemusta, ilmoitusta tai rakennustyömaan työmaasuunnitelmaa.

Helsingin kaupunki (2013) on laatinut työmaavesien hallintaa varten ohjeen, johon on koottu ohjeistusta työmaavesien käsittelyyn. Käsittelyä varten tulee mm. arvioida työ-

maalla muodostuvien vesien määrä ja laatu, valita käytettävät laitteistot sekä suunnitella laitteistojen käyttö- ja huoltotoimenpiteet. Ohjeessa on annettu työmaavesille laatuvaatimukset ja esimerkkejä käsittelytavoista. Käsittelytavat on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Esimerkkejä työmaavesien käsittelystä (Helsingin kaupunki 2013)

Poistettava aine tai ominaisuus	Käsittelymenetelmä
Kiintoaine ja siihen sitoutuneet haitta-aineet ja ravinteet	Lasketusaltaat Viivytys Hiekanerotus Suodatus Kemikaalinen saostus eli flokkaus Märkäsykloni
Öljy	Öljynerotin Aktiivihiilisuodatin
Muut orgaaniset yhdisteet	Aktiivihiilisuodatin
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)	Ilmastus + aktiivihiilisuodatin katalyyttinen poltto
Liuenneet metallit	Saostaminen kemikaaleilla Ultrasuodatus Käänteisosmoosi
Alhainen tai korkea pH	pH:n säätö
Ravinteet (typpi ja fosfori)	Biologinen ja/tai kemiallinen puhdistus (saostus, ilmastus, laskeutus)

Koska työmaavesien käsittely voi olla hankalaa toteuttaa työmaaoloissa, vedet voidaan kuljettaa myös muualle käsiteltäväksi (Helsingin kaupunki 2013).

2.2.5 Ojitus

Ojituksella tarkoitetaan vesilain (2011) mukaan ojan tekemistä sekä ojan, noron tai puron suurentamista maan kuivattamiseksi tai alueen käyttöä muuten haittaavan veden poisjohtamiseksi. Noron tai puron perkaaminen määritellään ojitukseksi jos perkaamisesta ei aiheudu yläpuolella olevan järven keskivedenkorkeuden alenemista.

Ojituksen luvanvaraisuus ja ilmoitukset

Ojitustoiminta vaatii aluehallintoviraston luvan, jos ojitus voi aiheuttaa pilaantumista vesialueella. Vesialueella tarkoitetaan mitä tahansa muuten kuin tilapäisesti veden peittämää aluetta, eli pilaantumisvaara koskee myös esimerkiksi uomia ja ojia. (VL 2011). Pilaantuminen on määritelty ympäristönsuojelulaissa (2014) ja se tarkoittaa esimerkiksi terveyshaittaa, haittaa luonnolle ja sen toiminnoille, yleisen viihtyvyyden, kulttuuriarvojen ja virkistyskäytön vähentymistä, haittaa omaisuudelle, luonnonvarojen käytön estymistä tai muuta näihin rinnastettavaa edun loukkausta.

Jos ojan voidaan katsoa muuttuneen luonnontilaisen kaltaiseksi uomaksi, voi ojan kunnossapito olla luvanvaraista. Ojitus on luvanvaraista kun ruoppausmassojen määrä ylittää 500 m³. (VL 2011).

Jos ojitustoiminta ei ole luvanvaraista, hankkeesta vastaavan on ilmoitettava ojituksesta kirjallisesti ELY-keskukselle vähintään 60 päivää ennen ojituksen alkamista. Mikäli ojituksesta on määrätty tiesuunnitelmassa tai ratasuunnitelmassa, ojituksesta ei tarvitse tehdä ilmoitusta. (VL 2011).

Ojitusyhteisö

Yhteistä ojitusta varten on perustettava ojitusyhteisö, kun hyödynsaajia on vähintään kolme ja (i) ojitukseen tarvitaan lupa, (ii) sopimusta yhteisestä ojituksesta ei saada aikaan tai (iii) hyödynsaajan vaatimuksesta. Myös valvova viranomainen voi vaatia ojitusyhteisön perustamista. Ojitusyhteisön osakkaita ovat ne, jotka ojituksesta hyötyvät. (VL 2011).

Ojitusyhteisö perustetaan ojitustoimituksessa. Toimituksessa käsitellään ojitussuunnitelma, sen toteutusedellytykset ja päätetään kustannusten jakamisesta. Ojitusyhteisö vastaa myös ojan kunnossapidosta. Ojitusyhteisö on käytännössä ikuinen: jos ojitusyhteisö puretaan, ojat on saatettava luonnontilaisen kaltaiseen tilaan. (VL 2011).

Ojitussuunnitelma ja ojitus toisen alueella

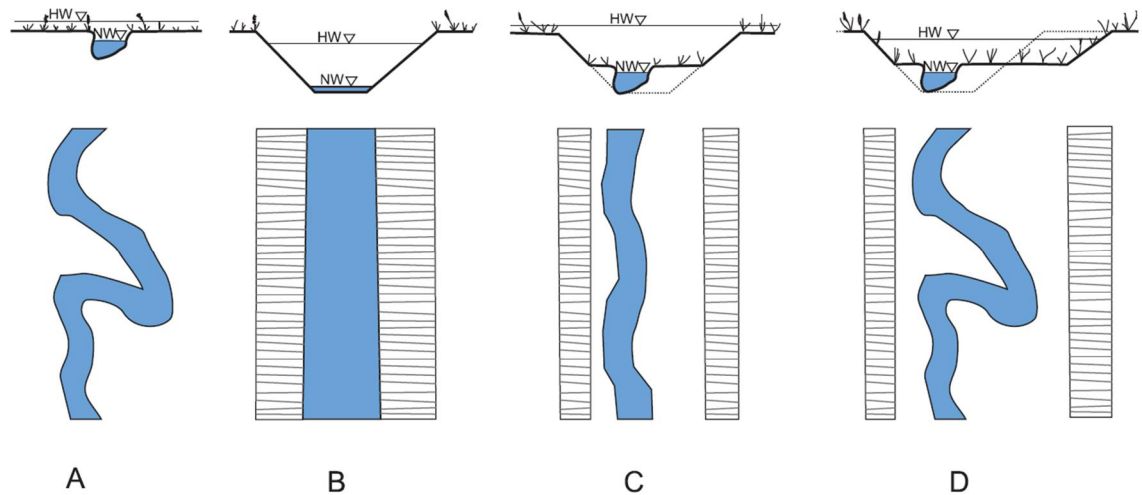
Ojitussuunnitelma laaditaan, jos ojitus edellyttää luvan tai ojitustoimituksen päätöstä tai ojitus on laaja. Suunnitelma sisältää tiedot hankkeesta, toteutustavasta, kuivatussyvyydestä, hyödyistä ja arvion vaikutuksista. (VL 2011).

Toisen alueella sijaitsevan ojan tai puron perkaaminen ja toisen alueelle rakennettavaa uutta ojaa varten tulee pyytää maanomistajan lupa. Jos ko. ojitus ei vaadi ojitustoimitusta tai lupaa, kunnan ympäristönsuojeluviranomainen ratkaisee mahdolliset ristiriitatilanteet. Jos ojitus tehdään asemakaava-alueella, ojan sijoittamisesta päätetään maankäyttö- ja rakennuslain nojalla. (VL 2011).

Luonnonmukainen vesirakentaminen

Ojan rakentaminen tai kunnossapito voidaan toteuttaa luonnonmukaisena. Luonnonmukaisen vesirakentamisen käyttö kuivatushankkeissa mahdollistaa uoman vedenjohtokyvyn turvaamisen parantaen samalla ojen vedenlaatua. (Näreaho et al. 2006).

Luonnonmukaisissa menetelmissä uomaan palautetaan mutkittlevan linjauksen lisäksi kapeampi osio alivirtaamaa varten, tulvatasanteita, pohjakynnyksiä ja lietekuoppia (Kuva 3). Eroosion vähentämiseksi virtausnopeutta ojassa pienennetään esimerkiksi pohjakynnyksillä. Kasvillisuudella voidaan sitoa ojan reunoja. (Näreaho et al. 2006).



Kuva 3. Ojituksen kehitys. Kuvassa A on luonnontilainen uoma ja B on perinteisesti perattu uoma. Kuvassa C perattu uoma on alkanut kasvaa umpeen ja kesävirtaamaa vastaava pienempi alivirtaamauoma on muodostunut. Kuvassa D uomaa on kunnostettu luonnomukaisesti: tulvien aikaista vedenjohtokykyä on parannettu levantämällä uomaa alivirtaamauoman yläpuolelta (tulvatasanko). Alivirtaamauoman annetaan jatkaa luontaista kehittymistään tai uoma voidaan kaivaa mutkittelevaksi. (Näreaho et al. 2006).

2.3 Hulevesien johtaminen

Johtamisjärjestelmillä tarkoitetaan rakenteita, joilla hulevesiä kootaan ja johdetaan pois hulevesien muodostumisalueilta. Johtamisjärjestelmät voidaan jakaa pinta- ja putkijärjestelmiin. Molemmat hulevesien johtamisjärjestelmät pyritään toteuttamaan painovoimaisesti. (Kuntaliitto 2012).

Pintajohtamisjärjestelmiä ovat avo-ojat, purot, viherpainanteet, kourut kanavat, muut avouomat ja rummut. Putkijärjestelmät koostuvat suurimmaksi osaksi maanalaisista putkista (hulevesiviemärit, salaojaputket), erilaisista kaivoista sekä venttiileistä, ylivuotorakenteista, pumppaamoista ja muista erikoisrakenteista. (Kuntaliitto 2012).

2.3.1 Pintajohtamismenetelmät

Pintajohtamismenetelmien tarkoituksena on hidastaa huleveden virtausta, joka mahdollistaa epäpuhtauksien laskeutumisen ja imeytymisen maaperään. Virtauksen hidastumista voidaan tehostaa kasvillisuudella ja pienellä pituuskaltevuudella. Pintajohtamisjärjestelmät soveltuvat alueille, joissa maankäyttö ja rakentaminen ovat suhteellisen vähäisiä. Menetelmän tulvaherkkyys on huomattavasti hulevesiviemäriä pienempi. Hulevesiä suositellaankin johdettavaksi pintajohtamisjärjestelmissä putkijärjestelmien sijaan (Kuntaliitto 2012). Valokuvia pintajohtamismenetelmistä on kuvassa 4.

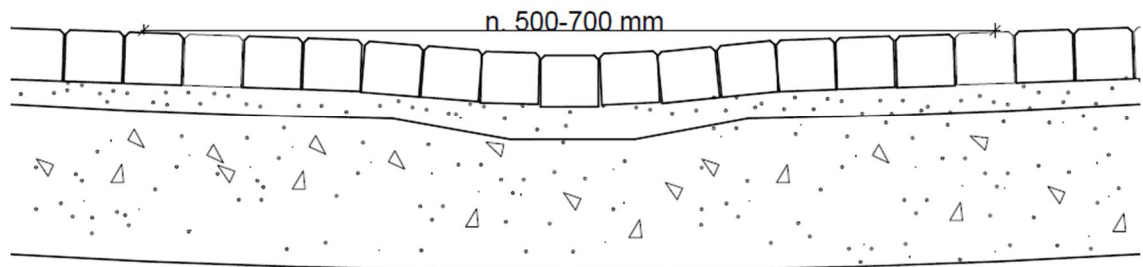


Kuva 4. Viherpainanne (vasemmalla) ja avo-oja (oikealla). Molemmat kuvat ovat Vantaalta. (Ilmastonkestävä kaupunki 2015a).

Ojat ovat perinteisiä hulevesien johtamisrakenteita. Ojia voidaan käyttää hulevesien johtamisen lisäksi rakenteiden kuivaamiseen – tämä voi edellyttää syvää ojarakennetta. (Kuntaliitto 2012). Ojan pohjan leveys on vähintään 0,5 m, sivuluiskien kaltevuuteen vaikuttaa maalaji ja ojan syvyys. Luiskakaltevuudet vaihtelevat 1:1...1:3 välillä. Ojan pituuskaltevuus on vähintään 0,3 %. (InfraRYL 2009).

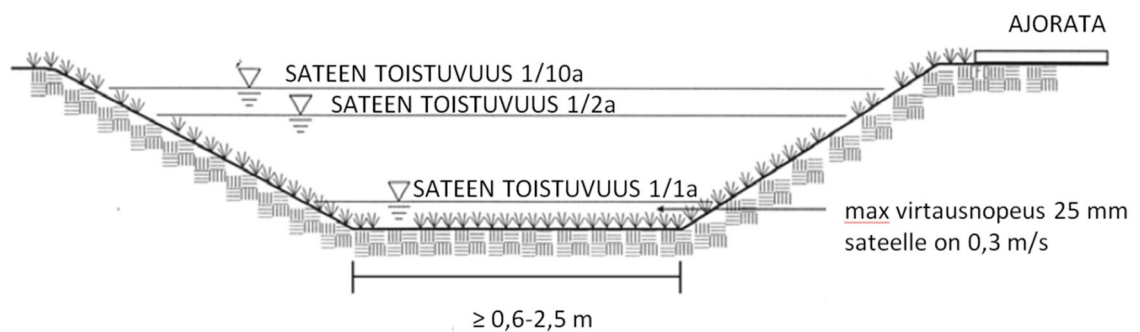
Ojissa virtaava vesi voi aiheuttaa voimakasta eroosiota ja sortumia. Varsinkin syvät, jyrkkäreunaiset ojat voivat olla kaupunkikuvaa rumentavia, turvallisuutta heikentäviä ja hankalia pitää kunnossa. (Kuntaliitto 2012).

Painanteet ovat matalia ja loivaluiskaisia hulevesien johtamisrakenteita. Matalan rakenteensa vuoksi painanteita ei ole tarkoitettu rakenteiden kuivatukseen. Painanteet ovat yleensä nurmetettuja tai muuten verhoiltuja. Painanteen suositeltava pituuskaltevuus on 1-3 %, leveys voi vaihdella metristä kymmeniin metreihin. (Kuntaliitto 2012) Esimerkki betonisesta painanteesta on kuvassa 5.



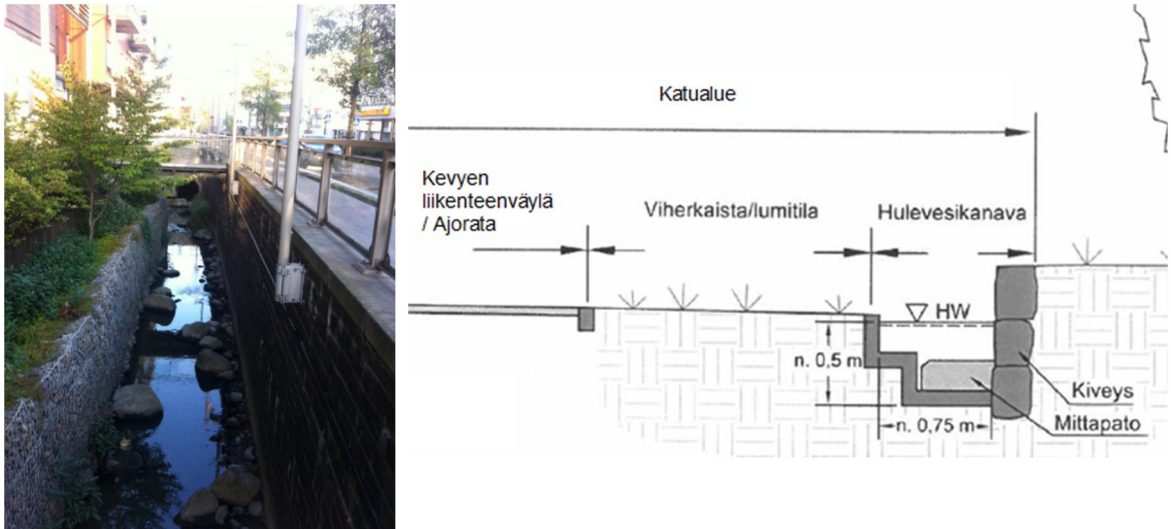
Kuva 5. Painanne betonikivistä. Betonikivien alla on 30-50 mm asennusalusta (asennushiekka tai maakostea betonimassa). Rakennekerrokset pohjarakennesseu-nitelman mukaan. (Lemminkäinen 2010).

Marylandin hulevesien suunnitteluohjeessa (MDE 2000b) kasvillisuuspeitteisille painanteelle on annettu seuraavat mitoituskriteerit: (i) sivuluiskien tavoitekaltevuus on alle 1:3, (ii) 1/10 a toistuva sade ei saa aiheuttaa eroosiota, (iii) painanteen tulee tyhjentyä 48 tunnin kuluessa. Tarvittaessa rakenteen alle voidaan toteuttaa salaojitus. Ohjeistusta vastaava poikkileikkaus on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Esimerkki painanteen nurmiverhoillusta poikkileikkauksesta. Virtausnopeus ei saa aiheuttaa eroosiota 1/10a vuoden toistuvuuden sateilla. (MDE 2000b).

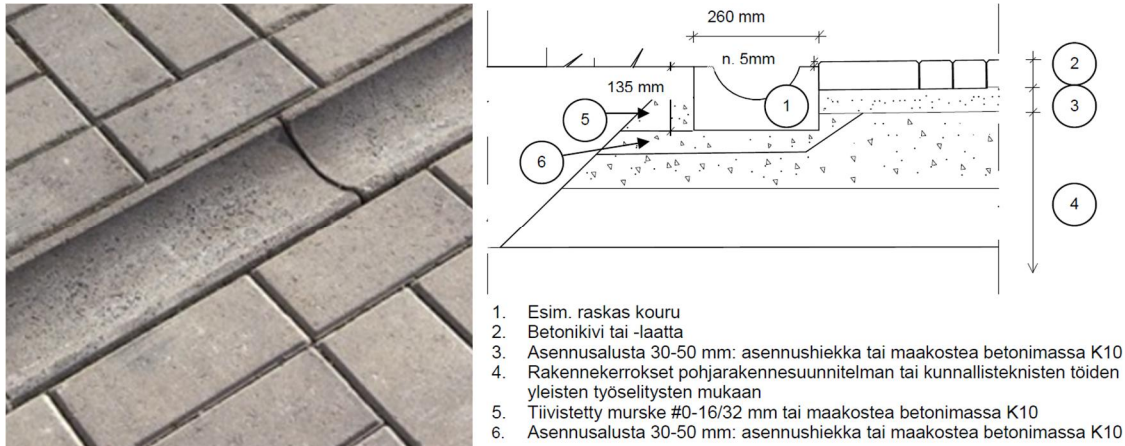
Kanavat ovat linjaukseltaan suoraviivaisia, betonista tai kivistä rakennettuja avouomia. Kanavien reunat ovat hyvin jyrkät tai pystysuoria. Tehokkaan poikkipinta-alan ja rakennetun ulkonäön ansiosta kanavia käytetään keskusta-alueilla. (Kuntaliitto 2012). Esimerkkejä kanavarakenteesta on kuvassa 7.



Kuva 7. Puroa varten rakennettu kanava Espoon Leppävaarassa (vasemmalla) (Ilmastonkestävä kaupunki 2014). Poikkileikkaus katualueen reunaan rakennetusta hulevesikanavasta (oikealla) (Hyöty et al. 2007).

Rakennetut purot ja norot voivat olla luonnonuomien kaltaisia linjaukseltaan mutkittelevia uomia. Noroja voidaan rakentamisen lisäksi muokata ojista muotoilemalla ja linjausta muokkaamalla. Noroihin voi liittyä levennyksiä, lampia, tulvatasanteita, sekä runsasta kasvillisuutta. Norojen pituuskaltevuus on yleensä vain muutamia prosentteja. Pienen pituuskaltevuuden, mutkaisuuden ja kasvillisuuden vuoksi virtaus noroissa on ojaa hitaampi. Rakennetut norot soveltuvat hulevesien pääpurkureiteiksi ja ne sijoittuvat yleensä virkistysalueille. Ajoittaisten suurten virtaamien vuoksi noron reunat ja mahdolliset pohjan kynnykset voivat vaatia eroosiosuojausta. Alivirtausuoma tulee toteuttaa riittävän kapeana, jotta vesisyvyys säilyisi riittävänä myös kuivina ajankohtina. (Kuntaliitto 2012).

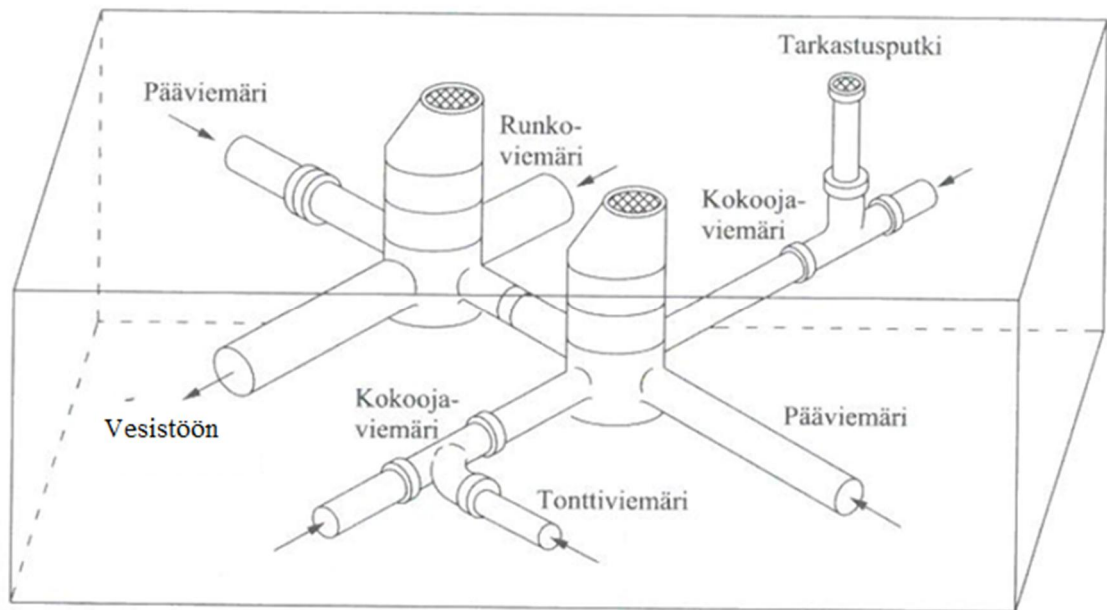
Kouru on pienten pintavesivirtaamien johtamiseen tarkoitettu matala ja kapea painane (kuva 8). Kouruja voidaan valmistaa betonista tai kivistä. Kouruja käytetään esimerkiksi kiinteistöjen kattovesien tai pysäköintialueen hulevesien johtamiseen viheralueille. Kouruja voidaan varustaa ritiläkansilla, jolloin kourun yläpinnasta tulee tasainen. (Kuntaliitto 2012).



Kuva 8. Esimerkkejä kouruista. Betoninen vesikouru (vasemmalla) (Rudus 2015) Kourun asennusohjeet (oikealla) (Lemminkäinen 2010).

2.3.2 Hulevesiverkosto

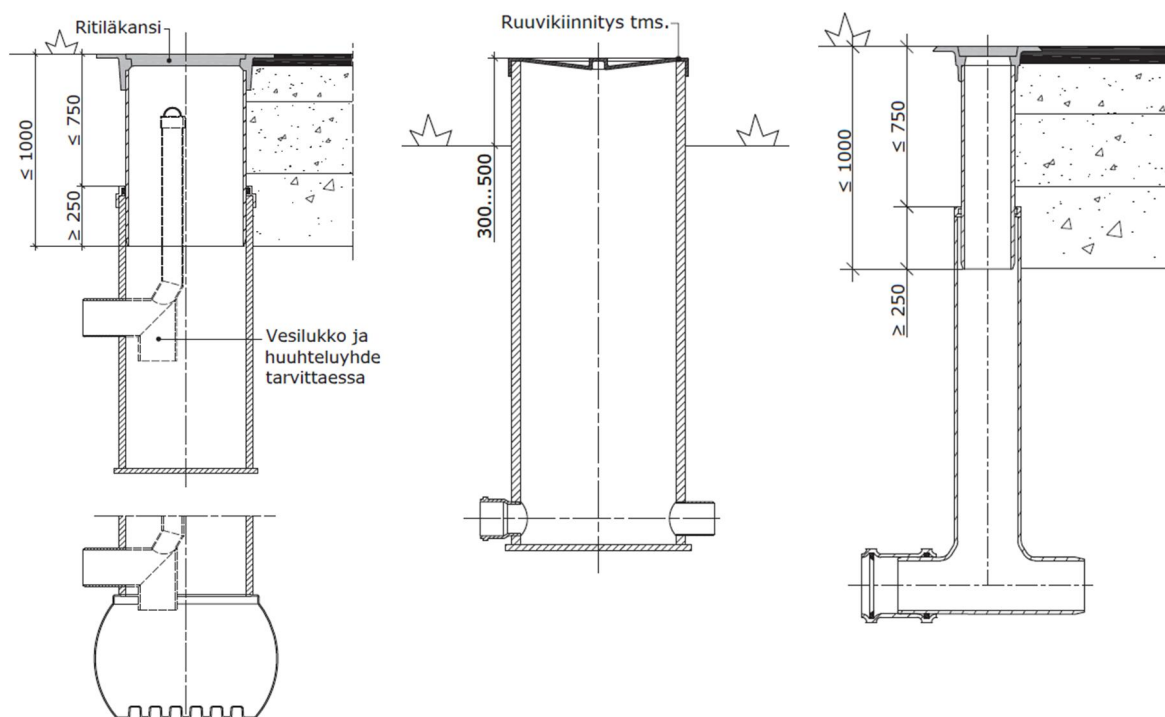
Hulevesiverkosto suunnitellaan keräämään sadevedet tehokkaasti kuivatettavilta pinnoilta. Hulevesiverkosto koostuu maanalaisista putki- ja kaivorakenteista. Verkoston rakenne on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Hulevesiviemäriverkoston rakenne. Muokattu Karttunen et al. 2004.

Hulevesi johdetaan verkostoon sakkapesällisten hulevesikaivojen kautta. Kaivot ovat yleensä muovia tai betonia. (Liikennevirasto 2013). Sakkapesä kerää hulevesien mukana tulevan kiintoaineen, muuten kiintoaine voi sedimentoitua viemäriin ja pienentää viemäriin välityskykyä (Kuntaliitto 2012). Asfalttialueilla kaivoja sijoitetaan vähintään yksi 600...800 m²:lle. Tiealueilla kaivoja sijoitetaan veden virtaussuunnassa vähintään 100 m välein. (Liikennevirasto 2013).

Hulevesikaivoista vesi johdetaan yhdys- eli viiksijohtoja pitkin verkostoon tarkastuskaivon tai -putken kautta (Kuntaliitto 2012). Tarkastuskaivoja rakennetaan putkien haaraumiin, linjan vaaka- ja pystytaitteisiin, sekä katusuunnitelman edellyttämiin kohtiin kuten jyrkkiin alusrakenteen muutoskohtiin. Tarkastuskaivoja on verkostossa 50...100 metrin välein. Myös tarkastuskaivoissa on lietepesät. (Liikennevirasto 2013). Esimerkkejä kaivorakenteista on kuvassa 10.



Kuva 10. Esimerkki muovisesta hulevesikaivosta (vasemmalla), tarkastuskaivosta (keskellä) ja tarkastusputkesta (oikealla) (InfraRYL 2009).

Suosittelut virtausnopeudet hulevesilinjoissa on 1...5 m/s. Tätä suuremmilla virtausnopeuksilla putkimateriaali alkaa kulua. (Kuntaliitto 2012). Hulevesiviemärin asennussyvyyteen (etäisyys maanpinnasta putken pohjaan) vaikuttavat routaraja, maaperä, lumipeitteen paksuus ja lämpöeristys. (Liikennevirasto 2013).

Hulevesiverkosto mitoitetaan johtamaan vain tavanomaiset sateet. Mitoitusta suuremmilla rankkasateilla järjestelmä saa tulvia. Rakenteiden ja rakennusten suunnittelussa tulee ottaa huomioon hulevesijärjestelmän sallittu tulvimiskorkeus eli padotuskorkeus. Padotuskorkeus määritellään liitoskohtalausunnossa ja se on usein 10 cm liittymiskohdan maanpinnan tason yläpuolella. Ylivuotoja varten verkostoon voidaan rakentaa ylivuotokynnys, joiden kautta tulvivat vedet johdetaan hallitusti pois verkostosta (Kuntaliitto 2012).

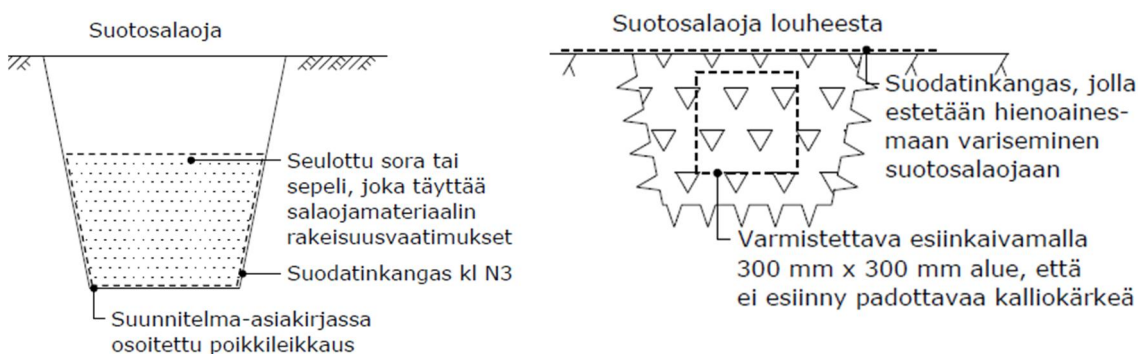
Hulevesijärjestelmissä voi olla pumppaamoita. Pumppaamoissa on yleensä kaksi pumpua, joista toinen on varapumppu. Pumppaamot liitetään kaukovalvontaan. Myös pumppaamoiden mitoituksessa sallitaan lyhytaikainen tulviminen pumppaamon ympäristöön. (Kuntaliitto 2012).

2.3.3 Salaojat ja suotosalaojat

Salaojat ja suotosalaojat ovat maan sisäisiä oja, jotka keräävät vettä koko pituudeltaan. Rakenteiden kuivattamiseen edellytys on, että sala- tai suoto-ojalla on vettä läpäisevä yhteys kuivattavaan kohteeseen. (Liikennevirasto 2013).

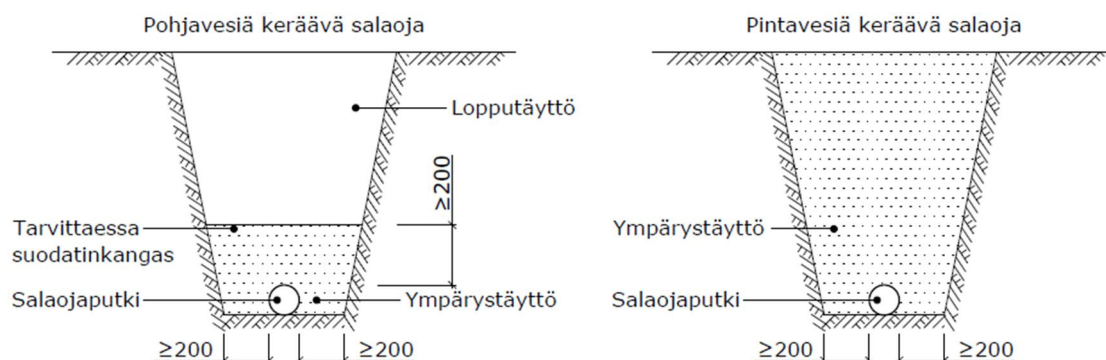
Mikäli salaoja kerää pohjavesiä, putki ei saa jäätymä talvella. Suurin jäätymisriski on yleensä imeytyskohdan ja purkuaukon välillä. Imeytystä suunnittelussa on estettävä salaojan yläpuolisen suotautumistien jäätyminen. (Liikennevirasto 2013).

Suoto-oja rakennetaan sorasta, kivistä tai sepelistä ja suodatinkankaasta (InfraRYL 2009). Suoto-oja käytetään yleensä alle 100 m matkoilla, kun pituuskaltevuus on vähintään 2 %. (Liikennevirasto 2013). Suotosalaojen rakenne on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Suotosalaojan poikkileikkauksia (InfraRYL 2009).

Salaojat rakennetaan yleensä 100 mm reijitetystä salaojaputkesta (Liikennevirasto 2013). Salaojaputki asennetaan 0,4 % vähimmäiskaltevuuteen ja salaojan ympärystäyttö tehdään salaojahiekasta, -sorasta tai -sepelistä. (InfraRYL 2009). Salaojat sijoitetaan haluttuun kuivatussyvyyteen, ellei jäätymistukosten vaara tai muu syy vaadi tätä suurempaa syvyyttä (Liikennevirasto 2013). Putkisalaojan poikkileikkauksia on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Pohjavesiä keräävän putkisalaojan (vasemmalla) ja pintavesiä keräävä putkisalaoja (oikealla) poikkileikkaus (InfraRYL 2009).

Salaojiin rakennetaan lietepesällisiä lietekaivoja vähintään 50 m välein (InfraRYL 2009). Salaojavedet puretaan sadevesiviemäriin, ojaan tai hulevesien viivytyksrakenteesseen, kuten kosteikkoon tai laskeutusaltaaseen. Salaojavesiä ei kannata purkaa yleiseen avo-ojaan juuri ennen rumpua, koska rumpu voi jäättyä talvella umpeen. Esimerkiksi peltosalaojan kokoojaoja kannattaa johtaa tien alitse omassa putkessa, jolloin avo-ojan rumpua ei joudu sijoittamaan salaojan määräämään syvyyteen. (Liikennevirasto 2013).

2.4 Viivytyksrakenteet

Viivytyksrakenteiden tarkoituksena on hidastaa ja tasata hulevesivirtaamaa. Rakenne tasaa lähtevää virtaamaa, kun sateilla veden tulovirtaama on suurempi kuin lähtövirtaama. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012). Viivytyksmenetelmät voidaan karkeasti luokitella painanteisiin, lammikoihin, kosteikkoihin, rakennettuihin altaisiin ja kaivantoihin. Näistä kosteikoissa, lammikoissa ja altaissa on tyypillisesti pysyvä vesipinta. (Kuntaliitto 2012). Kosteikkoja ja lammikkoja on käsitelty tarkemmin luvussa 2.6.

Veden virtausta rakenteesta voidaan säädellä padolla. Pohjapadossa eli ylisyyksypadossa vesi purkautuu patorakenteen korkeimman kohdan (patokannaksen) yli. Pintapadossa vesi kuljetetaan putkessa padon korkeimman kohdan alapuolelta. Purkurakenteita voi olla useampia: tavanomaista virtaamaa ja tulvavirtaamaa varten. Veden poisto tapahtuu viivytyksrakenteen pinnalta, jotta pohjalle laskeutunut kiintoaine ei lähde liikkeelle. (Hagelberg 2012).

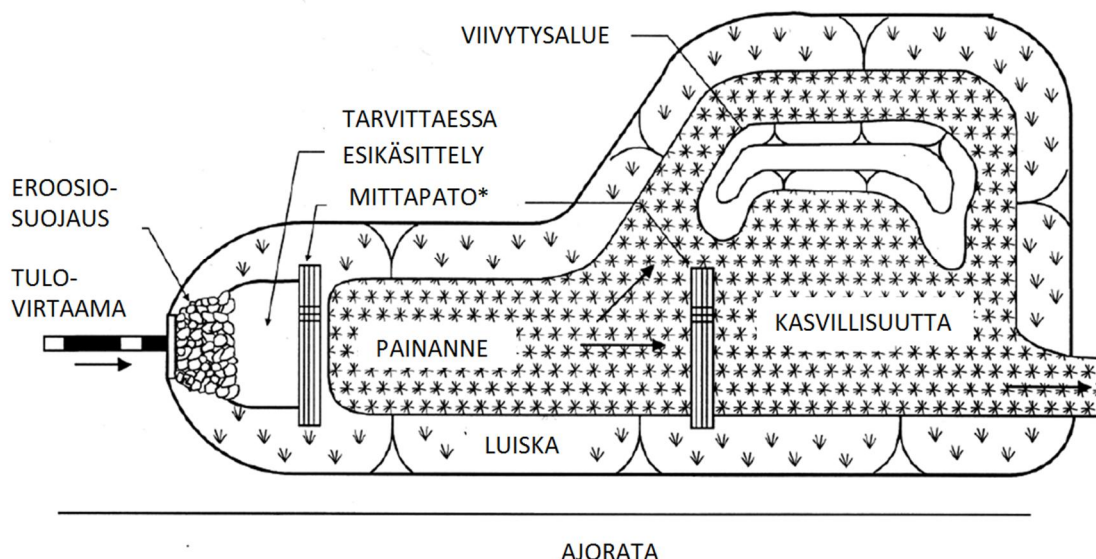
Erillisten viivytyksrakenteiden lisäksi avouomien virtaamaa voidaan hidastaa ja viivyttää rakentamalla uoman pohjalle pohjapatoja tai -kynnyksiä. (Kuntaliitto 2012). Esimerkkinä patorakenteista on kuvassa 13.



Kuva 13. Luonnonkivistä tehty pohjapato (vasemmalla), sekä vanerilevystä ja kivistä rakennettu pohjapato valtaojassa (oikealla) (Hagelberg et al. 2012).

Viivytyksen menetelmillä voidaan parantaa huleveden laatua, kun kiintoaine ja siihen sitoutuneet epäpuhtaudet laskeutuvat virtausnopeuden pienentyessä. Viivytyksen menetelmiin liittyy yleensä kasvillisuutta, joka tehostaa puhdistusvaikutusta sitomalla ravinteita ja hidastamalla virtaamaa. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

Viivytyksen painanne on matala ja loivaluiskainen syvennys. Painanne on usein kasvillisuuden peittämä, tai painanteen verhoilussa voidaan käyttää esimerkiksi kiviaineksia. Painanteen pohjaan rakennetaan yleensä pohjapato, purkuputki tai purkuaukko, jota pitkin viivytetty vesimäärä voi hitaasti tyhjentää. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää suotopatoa, joka on karkeasta maa-aineksesta tehty patorakenne, jonka läpi vesi voi suotautua. Padon korkeuden tulisi olla enintään noin puolet painanteen kokonaissyvyydestä. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012). Havainnepiirustus viivytyksen painanteesta on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Havainnepiirros painanteesta ja viivytyksen alueesta (MDE 2000a).

Rakennetut altaat ovat betonista tai kivistä rakennettuja hulevesien viivyttämistä varten tarkoitettuja vesialtaita. Altaat voidaan tehdä ulkonäöltään myös lammikoiden kaltaisiksi. Mikäli altaassa pyritään säilyttämään pysyvää vesipintaa, tulee allas rakentaa vesitiiviisti. Altaiden vesisyvyys on yleensä matala, vain muutamia kymmeniä senttimetrejä. (Kuntaliitto 2012).

Viivytyksen kaivannot ovat maanalaisia hulevesien viivytyksen rakenteita kuten tunneleita, putkia, säiliöitä tai kasettirakenteita. Esimerkkejä viivytyksen kaivannoista on kuvassa 15. Hulevedet johdetaan kaivantoon hulevesiviemäreillä tai salaojilla. Maanalaiset rakenteet soveltuvat tiiviisti rakennetuille kaupunkialueille, joissa maanpäällisille ratkaisuille ei ole tilaa. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).



Kuva 15. Esimerkkejä viivytskaivannoista. StormTech®-hulevesitunneli (vasemmalla) (RT 38572 2014), kiinteistökohtainen hulevesien viivytyssäiliö (oikealla) (PipeLife 2014).

Viivytsrakenteet tulee varustaa ylivuotoreitillä sekä kunnossapitotöitä varten tyhjennysputkella. Viivytsstilavuuden tulee tyhjentyä viimeistään vuorokauden kuluttua täyttymisestä, jotta tilavuus on käytettävissä seuraavan rankkasateen sattuessa. (Kuntaliitto 2012).

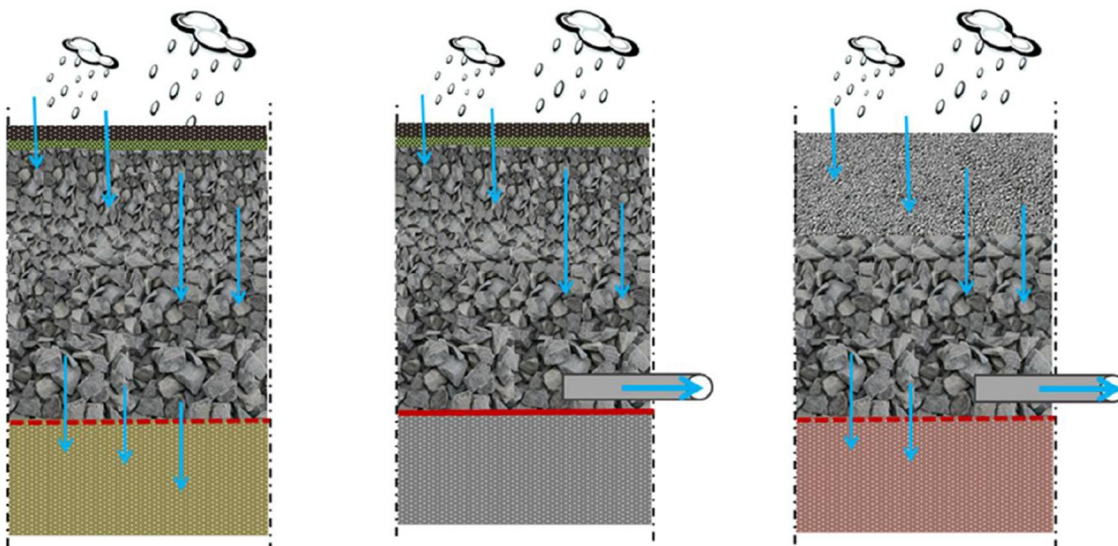
Huleveden viivytsrakennetta ei kannata mitoittaa varmuuden vuoksi liian suurina. Suurille virtaamille rakennettu järjestelmä ei välttämättä viivyts tavanomaisilla sateilla muodostuvia virtaamia, eikä sillä ole välttämättä haluttua suojavaikutusta tavanomaisen sateen aiheuttamaan eroosioon. (Kuntaliitto 2012).

2.5 Imeytys- ja suodatusrakenteet

Imeyttämisen tavoitteena on imeyttää pintavalunnaksi muodostunut hulevesi takaisin maaperään ja estää pohjaveden pinnan aleneminen. Huleveden suotautuessa maakerrosten läpi vesi puhdistuu maaperän fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten ominaisuuksien ansiosta. Alueilla, joilla maalajit ovat läpäiseviä ja vedet hyvälaatuisia, hulevedet voidaan imeyttää suoraan maahan. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

Imeytsrakenne voidaan myös salaojittaa, mikäli maaperän vedenläpäisykyky ei ole riittävä. Salaojitustason alapuolelle tulee jättää riittävä varastotilavuus imeytettävälle vedelle. Pohjavesialueilla, sekä heikosti vettä läpäisevällä maaperällä hulevedet voidaan suodattaa. Huleveden puhdistuminen perustuu samoihin mekanismeihin kuin imeytttämisessä. Suodatusrakenteen pohja voi olla eristetty maasta ja hulevedet kerätään rakenteen pohjalta salaojilla. (Kuntaliitto 2012).

Kuvassa 16 on esitetty imeyttävä järjestelmä suodattava järjestelmä ja näiden yhdistelmä.



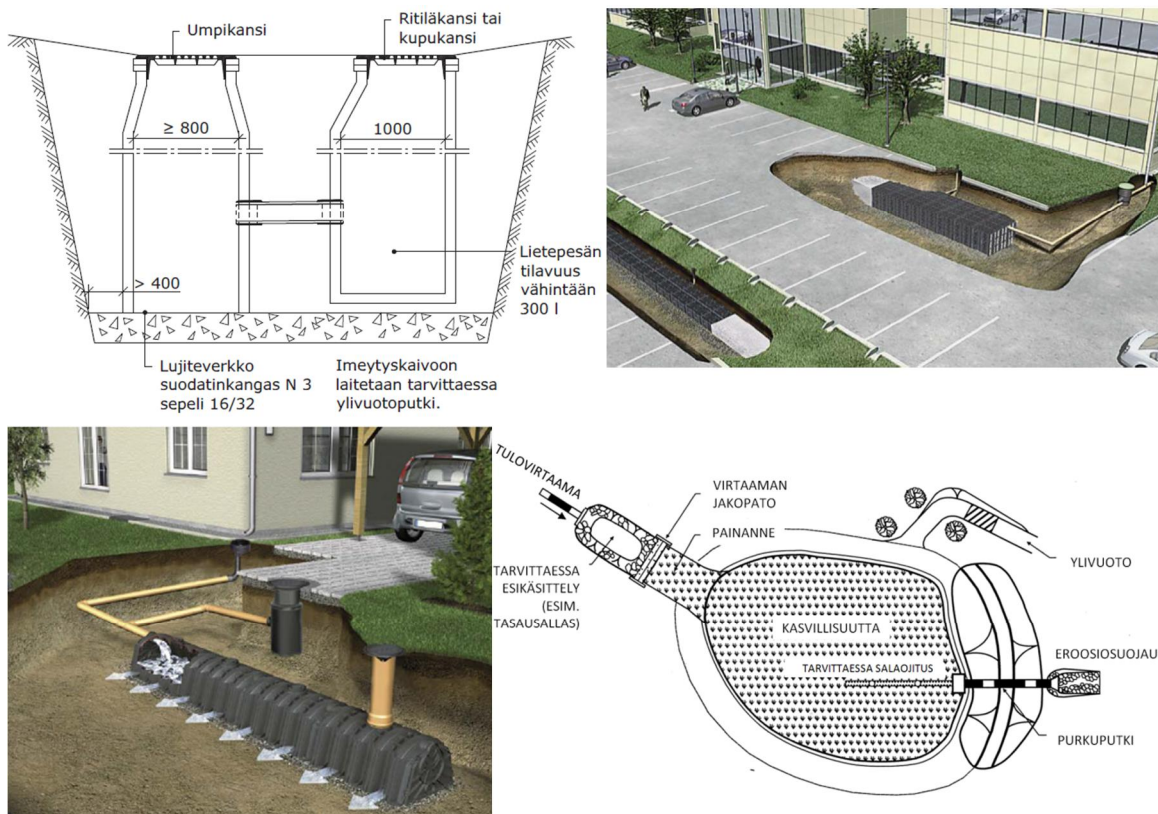
Kuva 16. Imeyttävä järjestelmä (vasemmalla), suodattava ja viivyttävä järjestelmä (keskellä) ja näiden yhdistelmä (oikealla) (Kling et al. 2015).

2.5.1 Imeytysrakenteet

Imeytys on tehokkain tapa hallita hulevesiä, koska se vähentää huleveden muodostumista (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012). Imeytysmenetelmiä voidaan toteuttaa hajautettuna järjestelmänä (esim. kiinteistökohtainen imeytys) tai keskitettynä ratkaisuna, jolloin yhdessä kohdassa imeytetään laajemmalta alueelta muodostuvia hulevesiä. Imeytysrakenteista on tarkasteltu kahta päätyyppiä: imeytyskaivantoja ja imeytyspainanteita. (Kuntaliitto 2012). Esimerkkejä imeytysrakenteista on koottu kuvaan 17.

Imeytyskaivannoissa hulevedet johdetaan pinnalta avoimeen kaivantoon, joka on täytetty karkealla kiviaineksella tai muulla huokoisella materiaalilla kuten muovikennos-toilla. Kaivantoon johdettu vesi varastoituu täytemateriaalin huokostilaan ja imeytyy hiljalleen ympäröivään maaperään. (Kuntaliitto 2012).

Hulevedet johdetaan maanalaiseen imeytyskaivantoon hulevesiviemäreillä tai salaojilla. Imeytyskaivannot tulee varustaa esikäsittelyllä kiintoaineen poistamiseksi, koska kiintoaine voi tukkia rakenteen. Sopivia esikäsittelymenetelmiä ovat hiekanerotuskaivo, pintavalutuskaista tai tasausallas. Imeytyskaivannot varustetaan tarkkailuputkella vedenpinnan seuraamiseksi ja ylivuoto- tai ohivirtausjärjestelmällä. (Kuntaliitto 2012).



Kuva 17. Esimerkkejä imeytysrakenteista. Tyypik kuva imeytyskaivosta (vasemmalla ylhäällä) (InfraRYL 2009). Kuva hulevesikasettijärjestelmästä (oikealla ylhäällä) ja tunnelirakenteesta (alhaalla vasemmalla) (Uponor 2013). Havainnepiirros imeytyspainanteesta (oikealla alhaalla) (MDE 2000a).

Imeytyspainanteet ovat kasvillisuuden peittämiä painanteita, joihin hulevedet johdetaan pintavaluntana. Painanne voi olla maavarainen tai painanteen pohjaksi on voitu rakentaa kasvukerros ja karkeasta kiviaineesta imeytyskerros. Painannemaisen muotonsa vuoksi hulevedet voivat lammikoitua, eli rakenteella on myös viivyttäviä ominaisuuksia. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012). Vesikerroksen paksuus painanteissa on korkeintaan 10-25 cm. Painanteen viivytystilavuuden tulee tyhjentyä viimeistään vuorokauden kuluttua täyttymisestä. (Kuntaliitto 2012).

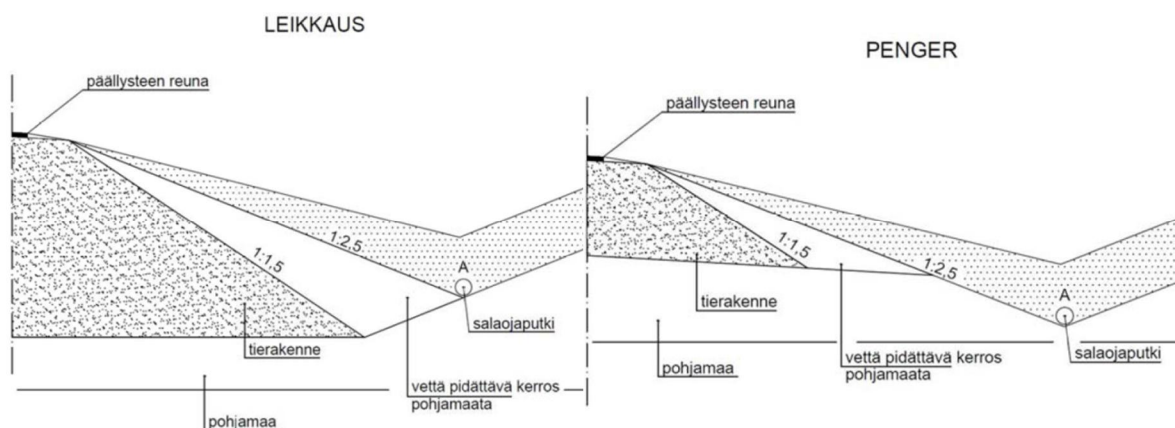
2.5.2 Suodatusrakenteet

Suodatusrakenteissa hulevedet johdetaan väliaineen läpi, joka pidättää vedestä epäpuhtauksia suodatuskerroksen pinnalle ja väliaineeseen. Suodattamalla hulevesistä saadaan poistettua haitta-aineita ja tasattua virtaamia. Suodatinrakenteet muistuttavat päällisiltä kerroksiltaan imeytysrakenteita, erona on rakenteen pohjalle asennettu salaoja, joka johtaa suodatetun veden eteenpäin. Tarvittaessa suodattimelle voidaan tehdä tiivis pohjarakenne, joka estää suodatetun veden pääsyn pohjaveteen. (Kuntaliitto 2012).

Yksinkertaisimmat suodatusjärjestelmät ovat kasvillisuutta hyödyntäviä pintavalutuskaistoja tai viherpainanteita, joissa vesi suodattuu kasvillisuuden ja kasvukerroksen läpi.

Painanteessa suodatuksen osallistuu pinnan kasvillisuus sekä alempi suodatuskerros. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

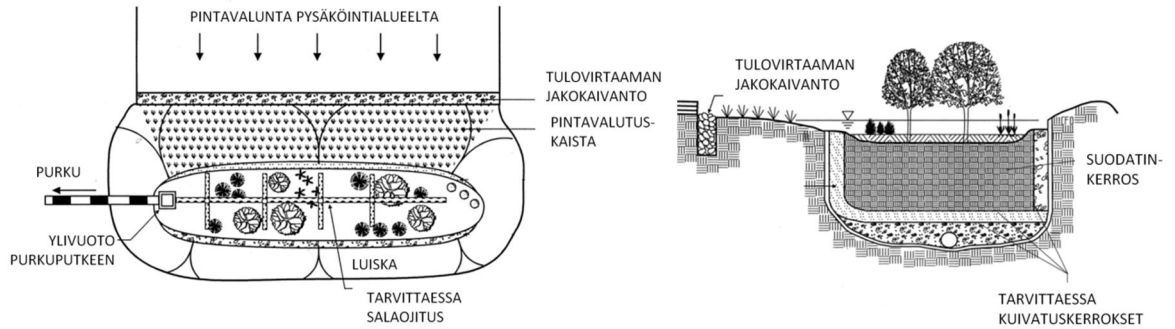
Liikenneviraston ohjeessa teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu (2013) maanteiden hulevesien yhtenä käsittelymenetelmänä esitettiin kaksikerroksinen sivuoja (kuva 18). Tavanomaiset sateet suodattuvat ojan pohjan läpi. Puhdistunut vesi voidaan imeyttää maahan tai johtaa salaojassa purkuvesistöön. Suuremmilla virtaamilla vesi ei ehdi imeytyä vaan se johdetaan ojan pintaa pitkin eteenpäin. Ratkaisun etuna on, ettei se välttämättä vaadi tavanomaista leveämpää sivuoja.



Kuva 18. Kaksikerroksisen sivuoja leikkaus- ja pengerrakenteessa. (Liikennevirasto 2013).

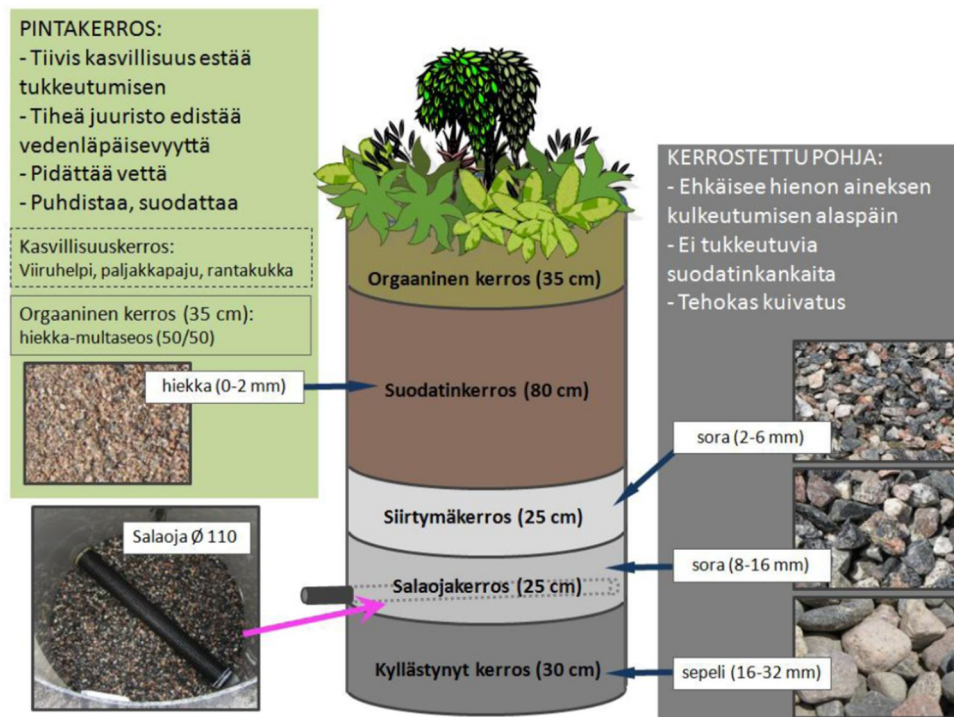
2.5.3 Biopidätysalueet

Lievästi likaantuneet vedet voidaan käsitellä biopidätysalueilla, joissa puhdistusvaikutusta tehostetaan kasvillisuudella, humuspitoisella pintamaalla ja hiekkakerroksella, johon on sekoitettu savea. Biopidätysalueella kiintoaine suodattuu rakenteen pintaan, liukoiset haitta-aineet pidättyvät biologisesti aktiiviseen pintamaahan tai juuristoon tai kemiallisesti aktiiviseen saviainekseen. Biopidätysalue voidaan toteuttaa imeyttävänä tai suodattavana. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012). Esimerkki biopidätysalueen toteutuksesta on kuvassa 19.



Kuva 19. Esimerkki biopidätysalueen rakenteesta pysäköintialueen vieressä (MDE 2000a).

Kasvien valinnassa tulee huomioida olosuhteet: vaihteleva vesimäärä, metallien ja ravinteiden pidätyskyky. Rakenne toteutetaan painannemaisena, johon vesi voi tilapäisesti lammikoitua. Tämä lisää rakenteen varastotilavuutta. (EPA 821-R-99-012) Esimerkki biopidätysalueen rakenteista on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Esimerkki biopidätysalueen rakennekerroksista (Särkiaho & Sillanpää 2012).

Biopidätysalueita voidaan rakentaa mm. pysäköintialueiden välisaarekkeisiin tai viereen ja rakennusten läheisyyteen (Kuntaliitto 2012).

2.5.4 Läpäisevät päällysteet

Läpäisevässä päällysteessä päällystemateriaali tai materiaalin saumat ovat vettäläpäisevät. Satava vesi pääsee pintakerroksen läpi karkeasta kiviaineksesta valmistettuun rakennekerrokseen. Vesi varastoituu hetkellisesti kiviaineksen huokostilaan, josta vesi joko imeytyy maaperään tai josta se kerätään salaojilla eteenpäin johdettavaksi. Lä-

päisevät päällysteet parantavat huleveden laatua pidättämällä kiintoainetta. (Kling et al. 2015).

Läpäisevien päällysteiden yleisimpiä pintoja tai pintamateriaaleja ovat (i) päällystekivet tai -laatat, (ii) avoin asfaltti ja (iii) läpäisevä betoni. Myös vettä läpäisevällä kiviaineksella täytettävät kennostot voivat toimia päällystemateriaalina. Oman ryhmänsä muodostavat nk. nurmikivet ja muut vastaavat viherratkaisut. Esimerkkejä läpäisevistä päällysteistä on kuvassa 21. Suomessa läpäisevien päällysteiden pintamateriaaleille ei ole kaikilta osin vakiintunutta laadunvalvontamenetelmää tai hyväksyntämenettelyä. (Kling et al. 2015).



Kuva 21. Esimerkkejä läpäisevien päällysteiden pintamateriaaleista: noppakiveys (ylhäällä vasemmalla), seulanpääkiveys (ylhäällä oikealla), golfkiveys (alhaalla vasemmalla) ja louhikiveys (alhaalla oikealla). (Rudus Oy 2015).

Läpäiseviä päällysteitä voidaan käyttää esimerkiksi pysäköintialueilla, kevyenliikenteenväylillä ja torialuilla. Päällysteet eivät kestä raskasta liikennettä, joka rajoittaa niiden hyödyntämistä. (EPA 821-R-99-012).

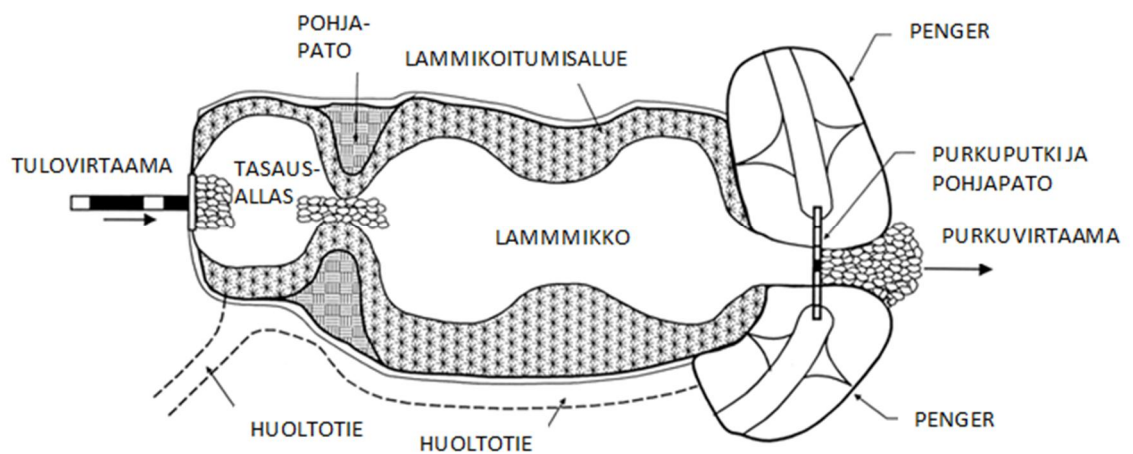
2.6 Lammikko ja kosteikot

Lammikko on huleveden viivytystä varten rakennettu pienikokoinen allas. Lammikon pysyvä vesisyvyys on noin 1 m ja maksimissaan vettä on noin 2,5 m. Kosteikossa vesisyvyys on vain muutamia kymmeniä senttimetrejä ja siinä on lammikkoa monipuoli-

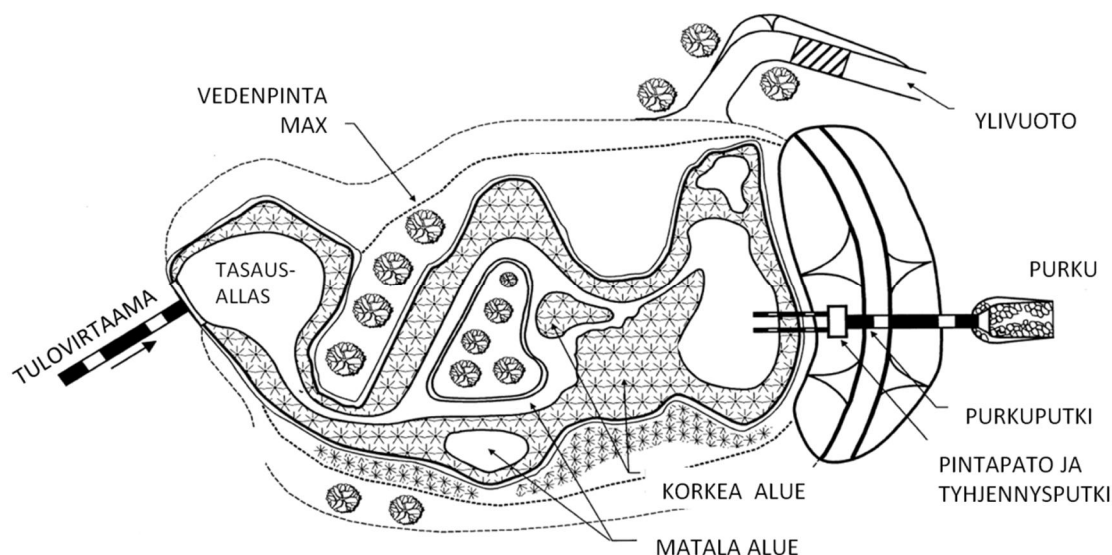
sempi kasvillisuus. Matalan vesisyvyyden vuoksi kosteikko vaatii paljon tilaa. (Kuntaliitto 2012). Esimerkki toteutetusta lammikosta ja kosteikosta on esitetty kuvassa 22 ja esimerkki rakenteista kuvissa 23 ja 24.



Kuva 22. Valokuva lammesta (vasemmalla) ja kosteikosta (oikealla) (Ilmastonkestävän kaupungin suunnitteluopas 2015a).



Kuva 23. Esimerkki lammikon rakenteesta (MDE 2000a).



Kuva 24. Esimerkki kosteikon rakenteesta (MDE 2000a).

Lammikon ja kosteikon puhdistusteho perustuu (i) laskeutukseen, (ii) epäpuhtauksien sitoutumiseen kasvillisuuteen sekä (iii) mikro-organismien avulla tapahtuvaan epäpuhtauksien hajotukseen. Lammen puhdistusteho vaihtelee keskinkertaisesta hyvään. Kosteikon puhdistusteho on yleensä lammikkoa parempi, koska kosteikko voi pidättää liukoisia ravinteita kasvukauden aikana. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

Molempien rakenteiden alkuun suositellaan tasausallasta, johon helposti laskeutuva kiintoainekuormitus laskeutuu. Tämä vähentää rakenteiden ylläpitokustannuksia. Huollon vuoksi lammikon pohjaan rakennetaan tyhjennysputki, jolla pysyvän veden alue saadaan tarvittaessa tyhjennetyksi. Tämä vähentää kunnossapitotöitä. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

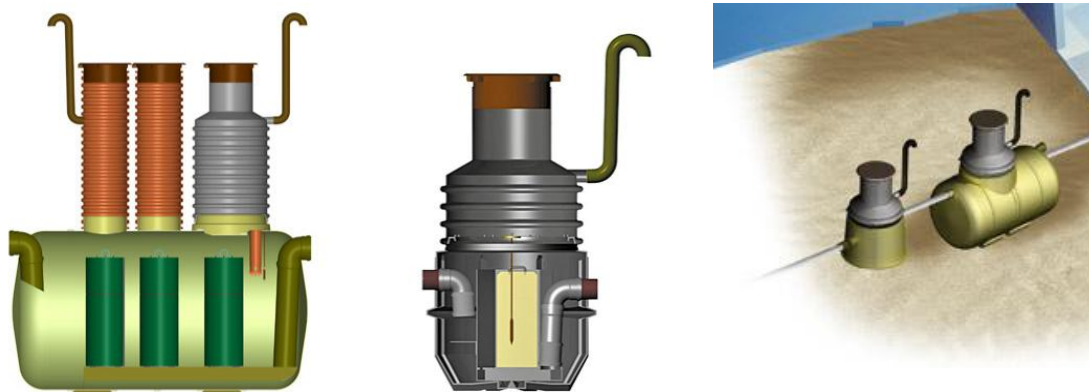
2.7 Öljynerotuskaivot

Rakennusmääräyskokoelman D1 (2007) mukaan huoltoasemalta, öljyn varasto- tai liikennöintialueelta, pysäköintialueilta ja erityisalueilta muodostuvat hulevedet tulee käsitellä öljynerotimilla. Öljynerotimen luokkaan vaikuttaa hulevesien purkupaikka (taulukko 4).

Taulukko 4. Öljynerotimen luokka hulevesille (RakMK D1 2007). Taulukossa I=luokan I erotin, II on luokan II erotin ja IIb on luokan II erotin by-pass ohituksella.

Huleveden muodostumisalue	purku jätevedenpuhdistamolle	purku muualle
Huoltoasema	II	I
Öljyn varasto ja liikennöintialueet tms.	II/IIB	I
Pysäköintialue, (erityisalueet)	II/IIB	I

Öljynerottimen lietetilan vähimmäistilavuus esimerkiksi pysäköintialueilta ja huolto-
asemien piha-alueilta (kattamaton) on vähintään 600 dm^3 . Tilavuus lasketaan erottimen
nimellisvirtaaman $NS [\text{dm}^3/\text{s}]$ ja öljyn tiheyskertoimen f_d välisellä suhteella $200 NS/f_d$.
(RakMK D1 2007). Esimerkkejä erilaisista öljynerotusjärjestelmästä on kuvassa 25.



Kuva 25. Esimerkki öljynerottimista: luokan I öljynerotin NS20-150 (vasemmalla), luokan I öljynerotin NS3-10 (keskellä) ja luokan II öljynerotin (oikealla) (Wavin Labko 2015).

2.8 Kasvillisuus

Kasvillisuudella on merkittävä rooli hulevesijärjestelmissä. Kasvillisuus vähentää muodostuvan huleveden määrää (haihdunta ja veden käyttö), suojaa maaperää ja pintoja veden kuluttavalta vaikutukselta ja vähentää eroosiota. Lisäksi kasvillisuus puhdistaa hulevesiä (pidättää ja sitoo ravinteita) sekä tehostaa hulevesirakenteissa tapahtuvia fysi-
kaalisia ja kemiallisia puhdistusprosesseja esimerkiksi hidastamalla virtaamaa. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

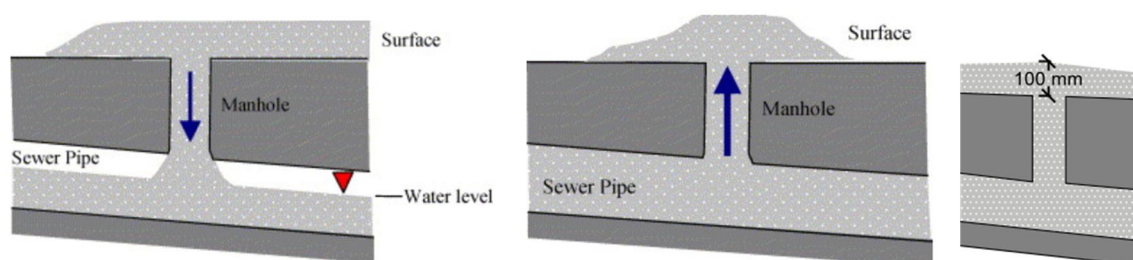
Biosuodatus- ja imeytysalueilla kasvillisuus edistää veden imeytymistä maaperään ylläpitäen maakerroksen huokoisuutta ja läpäisevyyttä. Kasvillisuudella on myös eettisiä, virkistysellisiä, sosiaalisia ja ekologisia vaikutuksia. Yleensä rehevä, monilajinen ja kerroksellinen kasvillisuus pidättää ja puhdistaa hulevesiä tehokkaimmin. Monilajinen kasvillisuus kestää paremmin vaihtelevia olosuhteita ja puhdistaa monipuolisemmin haitta-aineita. (EPA 821-R-99-012, Kuntaliitto 2012).

2.9 Tulviminen ja tulvareitit

Tulvimista tapahtuu, kun muodostuva hulevesimäärä ylittää vastaanottavan järjestelmän kapasiteetin (kuva 26). Vesi voi tulla pinnoilla viemärijärjestelmän tulojärjestelyiden kapasiteetin ylittyessä, jolloin pinnoille kertynyt vesi ei pääse kaivorakenteita pitkin viemäriin vaikka viemäriin olisi tilaa. Viemäriin kapasiteetin ylittyessä vesi tulvii kaivoja pitkin ylös pinnoille, joista ne on jo kerran johdettu viemäriin. (Mark et al. 2004).

Hulevesirakenteisiin on voinut myös kertyä sedimenttiä, kasvillisuutta, jätää tai roskia, jotka estävät huleveden virtaaman suunnitellusti.

Hulevesijärjestelmien tulviminen on sallittua. Rakennusmääräyskokoelman D1 (2007) mukaan sade- ja sekaviemäroinnissä padotuskorkeutena pidetään yleensä kadun pintaa +100 mm tonttviemärin liitoskohdassa (kuva 26).



Kuva 26. Tulviminen voi aiheutua liian pienestä tulo- ja viemärisäiliöstä (vasemmalla) tai hulevesiviemärin kapasiteetin ylittymisestä (keskellä) (Mark et al. 2004). Sallittu padotuskorkeus +100 mm (oikealla).

Ilmatieteenlaitos on tutkinut ukkoskuurojen aiheuttamia äkillisten tulvien vaikutuksia taajamissa ja kaupungeissa. 100 mm ja 140 mm sateiden vaikutukset on koottu taulukoon 5 (Ilmatieteenlaitos 2015).

Taulukko 5. Äkkitulvien vaikutuksia Suomessa 100mm ja 140 mm sateilla (Ilmatieteenlaitos 2015).

100 mm rankkasade	140 mm rankkasade
Viemäriverkko täyttyy vuotovesistä, vesi nousee kaduille ja rakennuksiin	Sadevettä ja viemäriverettä on tulvinut rakennuksiin
Sadevesi tulvii rakennusten kellareihin ja pohjakerrokseen	Suurelle määrälle rakennuksia vahinkoja
Sadevesi kertyy matalimmille katuosuuksille kuten siltojen alituksiin	Hissikuiluihin voi kertyä vettä
Tulviva vesi voi siirtää kaivojen kansia	Useita katuja joudutaan sulkemaan, jolloin osa rakennuksista on motissa
	Tulvavedet saartavat rakennuksia
	Jäteveden mukana leviää taudinaiheuttajia
	Tierakenteet voivat romahtaa ja sorapintaiset tiet kärsivät vaurioita.
	Sillat voivat jäädä veden alle
	Alikulkukäytävät tulvivat
	Autojen moottorit voivat sammua jos ne ajetaan syvään veteen

Em. sateet ylittävät hulevesijärjestelmän kapasiteetin, jolloin vedet valuvat pintoja pitkin matalille alueille. Sademäärän kasvu 100 mm:stä 140 mm:iin kasvattaa huomattavasti sateesta aiheutuvia haitallisia vaikutuksia.

Tulvareittien tarkoituksena on johtaa tulvivat hulevedet pois alueilta, joilla tulvavesistä aiheutuu vahinkoa. Ilmastonmuutos ja sademäärän kasvu tulevat korostamaan tulvareit-

tisuunnittelun tarvetta, koska mitoitusta suurempia sadetapahtumia tulee aina esiintymään. Hulevesijärjestelmien suunnittelun yhteydessä tulisikin paneutua tarkemmin tulvareitteihin ja niiden toimivuuteen. (Kuntaliitto 2012).

Tulvareittitarkastelussa selvitetään huleveden kulkureitit hulevesien tavanomaisten johtamisjärjestelmien kapasiteetin ylityttyä. Tarkastelu alkaa muodostumisalueelta ja jatkuu purkuvesistöön tai alueelle, jossa tulvavedet eivät aiheuta haittaa. (Kuntaliitto 2012).

Valuma-alueelle tulee laatia tulvareittitarkastelu osana maankäytön suunnittelua, mielellään osayleiskaavatasolla. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon suurien vesimäärien ja virtaamien aiheuttamat vaikutukset, kuten eroosiohaitat tulvareiteillä ja rantavyöhykkeillä, sekä veden laadun heikkeneminen. Tulvavirtaamat tulisi johtaa mahdollisuuksien mukaan vesistön sijasta virtaamia tasaaville tulva-alueille. (Kuntaliitto 2012).

Yleensä merkittävimmät tulvariskit liittyvät suuria virtaamia johtaviin hulevesiviemäriverkoston pää- ja runkolinjoihin. Riskikohteita voivat olla myös katuja tai viheralueita alempana sijaitsevat tontit, alikulut jne. (Kuntaliitto 2012).

3. HULEVESIEN HALLINNAN MITOITUSKÄYTÄNNÖT SUOMESSA

Hulevesijärjestelmien mitoitusperusteena on valuma-alueella valitulla todennäköisyydellä tapahtuva sade- tai sulamistapahtuma. (Kuntaliitto 2012) Taajamatulvien kannalta lumikerroksen merkitys jää yleensä vähäiseksi. Lunta suuremman riskin muodostaa jää, joka tukkii kaivojen kannet aiheuttaen paikallisia tulvia. (Aaltonen et al. 2008).

Hulevesijärjestelmien mitoitus on riskinarviointia. Mitoitukseen vaikuttavat tulvariskin todennäköisyys eli mitoitusasteen toistuvuus ja tulvasta aiheutuvat seuraukset. Mitä merkittävämmästä maankäyttömuodosta (esim. pääliikenneväylät, sairaalat) tai vaikutuksista (kustannuksista) on kyse, sitä harvinaisemmalle sadetapahtumalle alueen kuivatus mitoitetaan. (Liikennevirasto 2013). Esimerkiksi hulevesiviemärijärjestelmät mitoitetaan sateelle, jonka toistuvuus on kerran 2-3 vuodessa, tulvareittien mitoitusasteen toistuvuus voi olla 100-200 vuotta (Kuntaliitto 2012).

Hulevesijärjestelmien mitoitukseen annetaan ohjeita Kuntaliiton julkaisemassa hulevesioppaassa (2012) ja Liikenneviraston ohjeessa (2013) Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Mitoitusvirtaaman muodostuminen rankkasateella on esitetty luvussa 3.1, johtamisjärjestelmien mitoitus luvussa 3.2 ja viivytystilavuuden laskenta luvussa 3.3. Mitoitus mallintamalla on esitetty luvussa 5.

3.1 Mitoitusvirtaama

Liikenneviraston ohjeen (2013) mukaan hulevesivirtaama määräytyy rankkasateen perusteella alle 10 ha valuma-alueilla maankäyttötavasta riippumatta. Rakennetuilla ja viemäroidyillä alueilla rankkasade on lähes aina merkittävin hulevesivirtaaman aiheuttaja.

Kuntaliiton (2012) hulevesioppaan ja liikenneviraston ohjeen (2013) mukaan rankkasateen aiheuttama mitoitusvirtaama lasketaan valuma-alueen pinta-alan, sateen intensiteetin ja valumakertoimen perusteella kaavalla 1.

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

jossa Q on mitoitusvirtaama, C on valumakerroin [-], A on valuma-alueen pinta-ala [ha] ja i on mitoitusasteen keskimääräinen intensiteetti [l/s*ha].

3.1.1 Mitoitussade

Mitoitussateen avulla määritetään suurin vesimäärä tai virtaama, joka järjestelmän on pystyttävä hallitsemaan. Mitoitussateella on kolme määrittävää ominaisuutta: (i) kesto, (ii) rankkuus eli intensiteetti ja (iii) toistuvuus eli todennäköisyys sadetapahtuman esiintymiselle. Mitoituksessa sateen intensiteetti oletetaan vakioksi. (Kuntaliitto 2012, Liikennevirasto 2013).

Mitoitussateen kesto valitaan niin, että valuma-alueen reunoille satanut vesi ehtii purkautumiskohtaan. Valuma-alueen koon kasvaessa sateen kesto pitenee ja sen rankkuus pienenee. Taulukkoon 6 on koottu alun perin Tielaitoksen (1993) antamat ohjeelliset mitoitusasteen kestoajat, joita käytetään sekä Kuntaliiton (2012) että Liikenneviraston (2013) ohjeessa. Toisinaan suurimman mitoitusvirtaaman voi aiheuttaa tarkastelupistettä lähimmän osavaluma-alueen virtaama, jonka vuoksi muodostuvia virtaamia tulee tarkastella myös osavaluma-alueittain (Kuntaliitto 2012). Esimerkiksi lähellä purkupistettä sijaitsevalta laajalta pysäköintialueelta saattaa muodostua suurempi virtaamapiikki lyhytkestoisella rankkasateella kuin koko valuma-alueelta.

Taulukko 6. *Mitoitussateen ohjeellinen kesto valuma-alueen pinta-alan perusteella (Tielaitos 1993, Kuntaliitto 2012, Liikennevirasto 2013).*

Valuma-alueen pinta-ala [ha]	Mitoitussateen kesto [min]
< 2	5
2...5	10
5...20	20
20...100	60

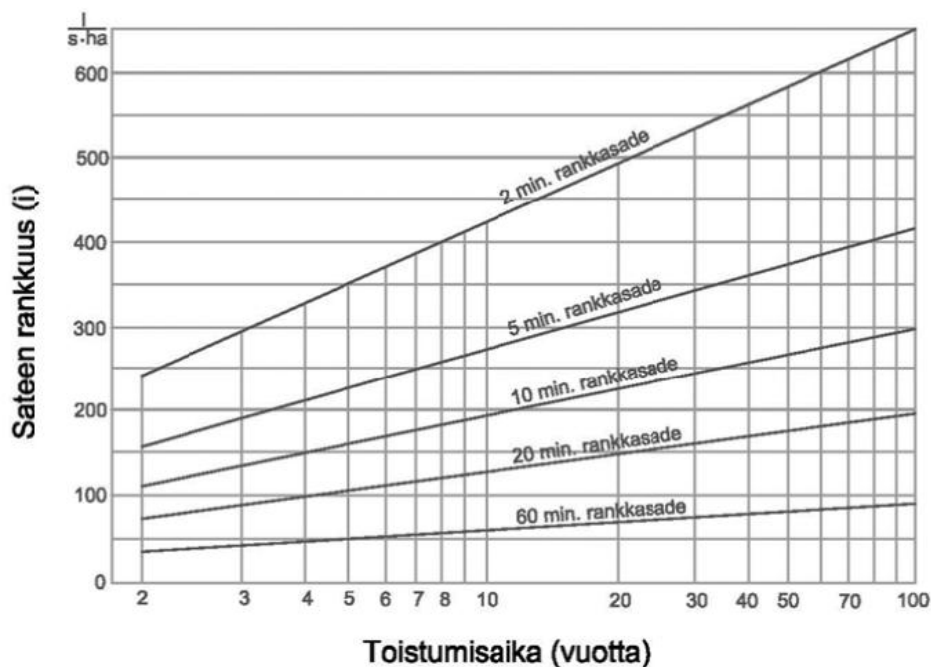
Mitoitussateen kestoa voidaan arvioida myös virtausreitin virtausnopeuden perusteella. Taulukkoon 7 on kerätty ohjeelliset virtausnopeudet eri johtamistavoille. Virtausreitti vaikuttaa huomattavasti huleveden kulkeutumisaikaan. Veden virtausnopeus putkessa on selvästi oja tai maastoa suurempi. (Kuntaliitto 2012).

Taulukko 7. *Ohjeellinen virtausnopeus (Kuntaliitto 2012).*

Virtausreitti	Ohjeellinen virtausnopeus [m/s]
Putket, pienet	1,5
Putket, suuret	1,0
Ojat	0,5
Maasto	0,1

Sateen rankkuuden valintaan vaikuttaa sateen toistuvuus eli kuinka usein mitoituksessa käytetty sade esiintyy. (Liikennevirasto 2013). Ilmastomuutoksen on arvioitu kasvattavan suurimpia sademääriä noin 20 % (Aaltonen et al. 2008). Hulevesioppaan mukaan toistuvuuden sijasta sateen esiintymistodennäköisyys tulisi esittää prosentteina (Kuntaliitto 2012).

Liikenneviraston ohjeen (2013) mukainen sateen rankkuus valitaan nomogrammistä (kuva 27) Nomogrammissa toistumisaika on esitetty vuosina ja sateen rankkuuden yksikkö on l/s*ha.



Kuva 27. Rankkasateen voimakkuus Suomessa (Liikennevirasto 2013).

Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU) -hankkeessa laadittujen säätutka-aineistojen perusteella on laadittu Hulevesioppaassa esitetyt taulukot mitoitusasteille nykytilanteessa (taulukko 8). Taulukossa 9 on huomioitu kasvihuoneilmion vaikutus.

Taulukko 8. Sateen keskimääräinen inteinsiteetti (l/s*ha) eri mittaisilla sadetapahumilla. Mitoitus perustuu säätutkamittauksiin keskimäärin 1km² alue-sadannalle Etelä-Suomessa. (Kuntaliitto 2012).

Toistuvuus	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
1/1a	117	80	78	50	33	18	11	6,9	4,2
1/2a	167	120	100	61	42	21	13	8,3	5,0
1/3a	183	130	111	72	47	23	14	8,8	5,2
1/5a	217	150	122	83	53	25	16	9,7	5,8
1/10a	233	180	156	100	64	30	19	10,9	6,9

Taulukko 9. Sateen keskimääräinen inteinsiteetti ($l/s \cdot ha$) keskimäärin $1 km^2$ aluesadannalle ottaen huomioon ilmastonmuutoksen arvioitu vaikutus. (Kuntaliitto 2012).

Toistuvuus	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
1/1a	140	96	94	60	40	22	13	8,3	5,0
1/2a	200	144	120	73	50	25	16	10,0	6,0
1/3a	220	156	133	86	56,4	28	17	10,6	6,2
1/5a	260	180	146	100	64	30	19	11,6	7,0
1/10a	280	216	187	120	77	36	23	13,1	8,3

Ilmastonmuutoksen vaikutus tulee huomioida suunnittelussa. Huomiointi tarkoittaa ensisijaisesti järjestelmän toimivuuden tarkastelua normaalia mitoitusta harvemmin toistuvalla sadetapahtumalla – ei tilavuuden tai välityskyvyn automaattista kasvattamista. (Kuntaliitto 2012).

3.1.2 Valumakerroin

Valumakerroin kuvaa sadannan ja pintavalunnan välistä suhdetta. Valumakertoimen arvo vaihtelee 0-1 välillä. Täysin läpäisemättömän pinnan valumakerroin on 1. Taulukossa 10 on esitetty Liikenneviraston ohjeen (2013) ja kuntaliiton hulevesioppaan mukaiset valumakertoimet. Kertoimet ovat julkaistu Tielaitoksen ohjeessa (1993).

Taulukko 10. Valumakertoimet erilaisille pinnoille (Tielaitos 1993, Kuntaliitto 2012, Liikennevirasto 2013).

Pinta	Valumakerroin C
Katto	0,8...1,0
Asfalttipäällyste	0,7...0,9
Soratie, soraluiska	0,2...0,5
Tien nurmetettu luiska	0,4...0,6
Nurmipintainen piha, puisto	0,1...0,4
Niitty, pelto, puutarha	0,1...0,3
Suo	0,05...0,15
Kumpuileva sekametsä	0,05...0,2
Tasainen metsämaasto	0,1
Tasainen sorakenttä	0...0,05
Avoin kalliomaasto	0,3...0,5

Valumakertoimeen vaikuttaa pinnan vedenläpäisevyyden lisäksi pinnan sileys, alueen kosteusvajausta ennen sateen alkua, sateen kesto ja rankkuus. Valumakertoimen arvo ei ole vakio vaan se vaihtelee sateen aikana. Pinnoille annettuja pienempiä valumakertoimia käytetään lyhytaikaisissa sateissa, kun maa on sula. Pieniä arvoja käytetään myös, jos alueen kaltevuus on pieni, ja pinta sisältää notkoja tai muita epätasaisuuksia, jotka hidastavat veden valumista ja mahdollistaa veden imeytymistä maahan. Varsinkin metsässä valumakertoimen arvot voivat vaihdella paljon. (Liikennevirasto 2013). Kuntalii-

ton hulevesioppaassa ohjeistetaan käyttämään pienempiä valumakertoimia mitoitettaessa usein toistuvia sateita (Kuntaliitto 2012).

Kuntaliiton (2012) ja Liikenneviraston (2013) ohjeen mukaan valuma-alueen keskimääräinen valumakerroin lasketaan pinta-alojen mukaan painotettuna keskiarvona.

3.2 Hulevesien johtamisjärjestelmät

Mitoitusvirtaaman määrityksen jälkeen mitoitetaan rakenne, jolla mitoitusvirtaama saadaan johdettua eteenpäin. Luvuissa 3.2.1-3.2.3 käydään läpi avouomien, rumpujen ja hulevesiviemäreiden mitoitusperiaatteet.

Kiinteistökohtaisten järjestelmien mitoitus poikkeaa yleisten alueiden hulevesijärjestelmien mitoituksesta. Mitoitus perustuu rakennusmääräyskokoelmaan ja se käydään läpi omana kohtana (luku 3.2.4).

3.2.1 Ojat ja painanteet

Hydrologinen mitoitus tehdään merkittävillä avouomilla, kuten kanaville, kivetetyille painanteille sekä teiden ja ratojen sivuojille. Katujen ja pienten valuma-alueiden (alle 1000...2000 m²) ojien ja painanteiden muoto ja syvyys eivät yleensä määräydy hydrologisen mitoituksen perusteella. (Kuntaliitto 2012).

Tien sivuojan syvyys mitoitetaan vedenjakajalla ja purkukohdassa. Sivuojan syvyyteen ja muotoiluun vaikuttaa mm. tien luokitus. Sivuojan pituuskaltevuuden tulisi olla vähintään 0,4 %, poikkeustapauksissa vähintään 0,1 %. Suurilla pituuskaltevuuksilla oja voi tarvita eroosiosuojausta. (Liikennevirasto 2013).

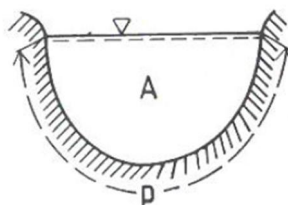
Laskuojat ovat pelloilta, metsiltä ja soilta tulevia ojia. Laskuojan koko tulee tarkistaa hydraulisesti valuma-alueen ylittäessä 20 ha. Laskuojan pituuskaltevuuden tavoitearvo on noin 0,4 %. Tasaisessa maastossa pituuskaltevuus voi olla tätä pienempi. Loivassa maastossa rummun jälkeisen ojan alku (20 m) tehdään jyrkkänä (0,5...1 %) rummun tukkeutumisen estämiseksi. Laskuojan kokoa säädelään pohjan leveydellä. Pohjan vähimmäisleveys on 0,5 m. (Liikennevirasto 2013).

Hydraulisella mitoituksella (kaava 2) tarkistetaan että uoman koko on riittävä virtaavalle vesimäärälle. (Liikennevirasto 2013, Tielaitos 1993, Hooli & Pohjamo 1990).

$$Q = \frac{A \times R^{2/3} \times J^{1/2}}{n} \quad (2)$$

jossa Q on virtaama [m³/s], A on uomassa olevan vesikerroksen poikkipinta-ala [m²], R on hydraulinen säde [m], J on uoman pituuskaltevuus ja n on uoman seinämän karkeuskerroin. Hydraulinen säde R esitetään veden poikkipinta-alan A ja märkäpiirin p välise-

nä suhteena $R = A/p$. Märkäpiiri on veden ja poikkileikkauksen seinämän kosketuspinnan pituus. Märkäpiiri ja veden poikkipinta-ala on esitetty kuvassa 28. Liikenneviraston ohjeen (2013) mukaiset avouoman karkeuskertoimet on esitetty taulukossa 11.



Kuva 28. Vesikerroksen poikkipinta-ala A ja märkäpiiri p (Hooli & Pohjamo 1990).

Taulukko 11. Avouoman hydraulisen virtaaman määrittämisessä käytettävät Manningin hankauskerroimet (Liikennevirasto 2013, Tielaitos 1993).

Avouoman pintamateriaali	Karkeuskerroin n
Sora ja hiekka	0,02...0,03
Savi ja siltti	0,025...0,04
Tasainen ruoholuiska	0,04...0,07
Epätasainen ruoholuiska	0,07...0,12
Luonnonuoma, paljon kasvillisuutta	0,08...0,15
Asfalttipinta	0,013...0,016
Betonikouru	0,013...0,018

Eroosiosuojauksen tarvetta voi arvioida uoman pintamateriaalin ja virtausnopeuden perusteella. Virtausnopeus v [m/s] voidaan laskea virtaaman Q [m³/s] ja veden poikkipinta-alaan A [m²] perusteella $v = Q/A$. Taulukkoon 12 on koottu suurimpia suositeltuja virtausnopeuksia eri uomamateriaaleille (Pajula & Järvenpää 2007).

Taulukko 12. Erilaatuisten uomien suurimmat sallitut keskimääräiset virtausnopeudet (Pajula & Järvenpää 2007).

Maalaji tai uoman verhouksmateriaali	Vmax [m/s]
Siltti, liejusavi	0,30
Hieno hiekkamaa	0,35
Konsolidoitumaton savimaa, maaton turve	0,40
Karkea hiekkamaa	0,45
Hieno soramaa	0,60
Raaka turvema	0,70
Karkea soramaa	0,80
Konsolidoitunut liava savimaa	1,15
Tiivis moreenimaa	1,20
Kivikko	1,50
Hyvin juurtunut nurmi	1,80
Betoniverhou	4,00

3.2.2 Rummut

Tie tai ratarakenne ylittää ojan tai muun pienen vesiuoman rummun avulla. Halkaisijaltaan alle 2 metriset rakenteet luokitellaan rummuiksi, yli kaksimetriset rakenteet ovat siltoja. (Liikennevirasto 2013, Tielaitos 1993).

Mitoitussateen toistuvuudelle on annettu liikenneviraston ohjeessa (2013) ohjeellisia tavoite- ja minimiarvoja. Mitoitussateen valintaan vaikuttavat rummun yläpuolinen maankäyttö ja rummun ylittävän väylän tärkeys. Kun rummun ylävirranpuolella on taaajama, merkittäviä rakenteita tai rakennuksia, mitoitusasteen toistuvuutena käytetään 1/100a. Mikäli tulvauhan alla on erityisen arvokkaita asuinrakennuksia, sairaaloita, hoitolaitoksia tai vaikeasti evakoitavia kohteita, mitoitusasteen toistuvuutena käytetään 1/250a.

Rummun yläpuolisen väylän vaikutukset sateen toistuvuustiheyksiin on esitetty taulukossa 13. Tavoitearvoa pienempi mitoitus voi tulla kyseeseen, mikäli vaikutukset rakennuskustannuksiin ovat huomattavat, ympäristön kannalta rakenteet muodostuisivat mahdottomiksi, eikä vedenpinnan noususta muodostuvat riskit ole suuria. (Liikennevirasto 2013).

Taulukko 13. Mitoitussateen ohjeelliset tavoite- ja minimitoistuvuudet rummun mitoituksessa (Liikennevirasto 2013).

Rummun ylittävä väylä	Mitoitussateen toistuvuus	
	Tavoite	Minimi
Rautatie, moottoritie	1/100	1/100
Valta- tai kantatie, ei varareittiä	1/100	1/10
Valta- tai kantatie, on tulvariskitön varareitti	1/20	1/5
Taajaman pääväylä	1/20	1/5
Seututie	1/10	1/5
Yhdystie	1/5	1/2
Yksityistie	1/2	1/1

Rummun minimikoko määräytyy yleensä kunnossapitönäkökohtien mukaan. Minimikoot tien tai liittymätyypin mukaan on esitetty taulukossa 14. (Liikennevirasto 2013).

Taulukko 14. Rummun minimikoko tien tai liittymätyypin mukaan (Liikennevirasto 2013).

Tien tai liittymän tyyppi	D _{rumpu} [mm]*
Rautatie	800
Kaksiajorataisen tien alitus	800
Valta- ja kantatien alitus	600
Kapean (rummun pituus ≤ 10 m) yhdystien alitus	400
Liittymä, rummun pituus > 8 m tai liittyvä tie on maantie	400
Liittymä, rummun pituus ≤ 8 m	300

*sisähalkaisija, johon sallitaan 10 % alitus

Rumpu kaventaa yleensä ojan tai uoman poikkileikkausta aiheuttaen padotusta ylävirran puolelle ja lisää virtauksen nopeutta. Ojien mitoituspadotukset ovat 20...150 mm riip-puen maankäytöstä ja uoman kaltevuudesta (taulukko 15). Padotuksen mitoitusarvoilla pyritään estämään virtausnopeuden kasvamisesta aiheutuva syöpyminen.

Taulukko 15. Mitoituspadotuksen enimmäismäärä (m) uoman koon, kaltevuuden ja maankäytön perusteella (pelto, taajama tai merkittävä raken-nus/metsämaa tai luonnonalueet) (Liikennevirasto 2013)

Uoman koko	Kaltevuus m/km					
	< 0,2	0,5	1	2	5	>10
Oja	0,02/0,02	0,02/0,03	0,03/0,04	0,04/0,06	0,06/0,08	0,10/0,15
Puro	0,01/0,02	0,02/0,03	0,03/0,04	0,04/0,05	0,05/0,07	0,05/0,10

Sallittu mitoituspadotus on metsämailla ja luonnonalueilla suurempi kuin peltojen, taa-jamien tai merkittävien rakennusten kohdalla. Pienillä kaltevuuksilla sallittu padotus-
korkeus on muutamia senttejä. Sallittu padotuskorkeus kasvaa kaltevuuden mukaan. Liikenneviraston (2013) ja Tielaitoksen (1993) ohjeen mukaan sallittu padotuskorkeus h [m] rummun yläpäässä lasketaan kaavalla (3).

$$h = D \times \frac{1}{2g} \left[\left(\frac{Q}{k \times A_r} \right)^2 - \left(\frac{Q}{A_u} \right)^2 \right] \quad (3)$$

jossa g on painovoiman kiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$, Q on mitoitusvirtaama [m^3/s], A_r on rum-mun virtausala [m^2] mitoitusvirtaamalla ilman padotusta ja A_u on yläpuolisen uoman virtausala [m^2] mitoitusvirtaamalla kun padotuksen oletettu suuruus huomioidaan. Pado-tuskerroin D [-] ja vastuskerroin k [-] valitaan taulukosta 16 aukkosuhteen A_r/A_u perus-teella.

Taulukko 16. Padotuskerroin D ja vastustuskerroin k aukkosuhteen (A_r/A_u) perusteel-la esitettynä $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $10 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaamilla (Liikennevirasto 2013, Tielai-tos 1993).

Aukkosuhte A_r/A_u	Padotuskerroin D	Vastustuskerroin k	
		$Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$
0,3	0,79	0,67	0,71
0,4	0,72	0,70	0,74
0,5	0,65	0,73	0,77
0,6	0,58	0,77	0,81
0,7	0,51	0,80	0,84
0,8	0,43	0,83	0,87
0,9	0,34	0,86	0,90

Liettymisen estämiseksi rummun jälkeiseen ojaan rakennetaan yleensä lieteallas, eli rummun laskuaukko sijaitsee 0,2 m ojan pohjan yläpuolella. Liettymisvaaran vuoksi rumpu tulisi rakentaa 0,5-1 % pituuskaltevuuteen. Ylisuuri kaltevuus (1-5 %) vähentää

liettymisen lisäksi myös jäätymistukoksia. Liittymien kohdalla rummun pituuskaltevuus on sama kuin sivuojalla. (Liikennevirasto 2013).

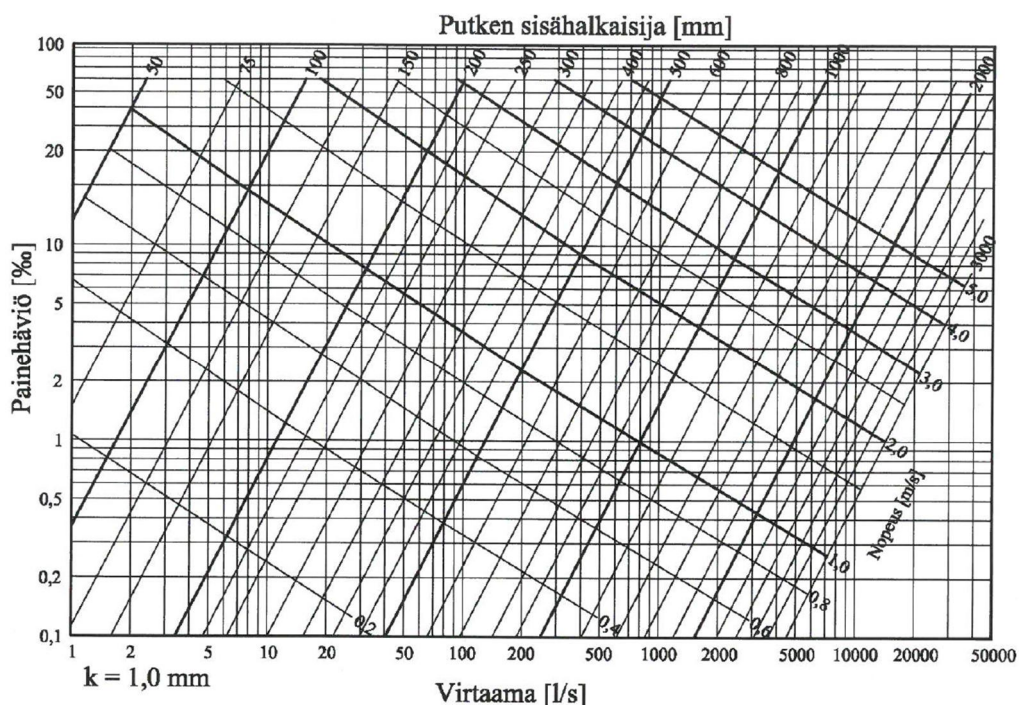
Rummun tukkeutumista varsinkin pienemmillä pituuskaltevuuksilla voidaan vähentää rakentamalla rummun jälkeinen laskuoja keskimääräistä jyrkempään pituuskaltevuuteen. Jyrkemmäksi osaksi riittää noin 20 metrin matka 0,5...1 % pituuskaltevuudella. (Liikennevirasto 2013).

Rummun korkeussijainnin valintaan vaikuttaa rummun yläpuolisen maaston ojitustarve ja tulevat ojitushankkeet. Roudan syvyys ei vaikuta rummun sijoituskorkeuteen. (Liikennevirasto 2013).

3.2.3 Hulevesiviemärit

Hulevesioppaan mukaan hulevesiviemäri mitoitetaan johtamaan mitoitusateen mukainen virtaama ilman padotusta. Mitoitusateen toistuvuus vaihtelee $1/2a \dots 1/10a$ välillä, yleensä käytetään kerran 2-3 vuodessa esiintyvää rankkasadetta. Tätä intensiivisemmät sateet aiheuttavat hulevesiverkoston tulvimisen, mikä on sallittua. (Kuntaliitto 2012). Liikenneviraston ohjeessa (2013) sadevesiviemärin mitoituksessa sateen toistuvuuden tavoitearvo on $1/10a$, minimiarvon ollessa $1/5a$.

Hulevesiviemärin mitoituksessa huomioidaan tulevan 20-40 vuoden aikana valuma-alueelle suunniteltu rakentamisesta aiheutuva virtaamalisäys, sekä ilmastonmuutoksen vaikutus. Hulevesiviemärin putkikoon mitoitus tehdään nomogrammeilla. Nomogrammi osoittaa täyden putken välityskyvyn tietyllä halkaisijalla ja kaltevuudella. Hulevesiviemäreiden ohjeellisena arvona putken karkeudelle eli virtausvastukselle voidaan käyttää Colebrookin arvoa $k=1,0$ (kuva 29) tai Hazen-Williamsin arvoa $C=120$. (Kuntaliitto 2012). Colebrookin karkeuskertoimen arvo 1,0 vastaa vanhan teräsputken tai vanhan valurautaputken karkeuskerrointa. Hazen-Williamsin arvo 120 vastaa betoniputkea tai 5 vuotta vanhan valurautaputken karkeuskerrointa. (Karttunen & Tuhkanen 2003).



Kuva 29. Hulevesiviemärin mitoitusnomogrammi $k = 1,0$ (Karttunen & Tuhkanen 2003, RIL 237-2-2010).

Taulukkoon 17 on koottu hulevesiviemärin pienimmät ja suurimmat suositeltavat minimikaltevuudet putkikoottain. Ohjeellisenä suurimpana virtausnopeuden arvona voidaan käyttää 5 m/s. (Kuntaliitto 2012).

Taulukko 17. Pienimmät ja suurimmat kaltevuudet hulevesiviemärille (Kuntaliitto 2012).

Putkikoko [mm]	Suosittelava minimikaltevuus [‰]	Suosittelava maksimikaltevuus [‰]
200	4,5	120
300	3,0	70
400	2,5	50
500	2,0	40
600	1,6	30
800	1,0	20
1200	1,0	15
1600	1,0	10

3.2.4 Kiinteistökohtaiset järjestelmät

Kiinteistöjen sadevesilaitteistojen mitoitus on esitetty rakennusmääräyskokoelmassa D1 (2007). Mitoitusvirtaama lasketaan kaavalla (4).

$$q = q_s (k_1 A + k_2 A + \dots + k_n A_n) \quad (4)$$

jossa q_s on mitoitussade [$\text{dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$], k_1 , k_2 , k_n ... ovat osa-alueiden valumiskertoimia ja A_n on valuma-alueen osan pinta-ala [m^2] vaakasuoralle pinnalle projisoituna.

Mitoitussateena käytetään yleensä $0,015 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Tulvimisen haitallisuudesta riippuen ja paikallisen viranomaisen luvalla mitoitussateena voidaan käyttää arvoja $0,010 \dots 0,020 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Valumiskerroin tiiviille päällysteille on 1 (katto asfaltti, betoni yms.), sorapäällysteille 0,7 ja päällystämättömille pinnoille sekä nurmikolle 0,3. (RakMK D1 2007).

Viettona toimivan sadevesiviemärin putkikoko määritetään rakennusmääräyskokoelmassa esitettyjen nomogrammien perusteella. Kiinteistön alueella hulevesiviemärit rakennetaan 10 % vähimmäiskaltevuuteen. Maahan sijoitettavan sadevesiviemärin pienin koko on DN 70 ja sadevesikaivosta lähtevän viemärin DN 100. (RakMK D1 2007).

3.3 Hulevesien määrällinen ja laadullinen hallinta

Hulevesioppaan (2012) ohjeellisten mitoituseriaatteiden mukaan huleveden käsittelyjärjestelmät mitoitetaan pysäyttämään ja käsittelemään 80 % vuosittaisista sadetapahtumista. Ohjeelliset mitoituserusteet hajautetuille ja keskitetyille määrällisille hallintajärjestelmille on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Kuntaliiton hulevesioppaan (2012) ohjeelliset mitoituserusteet hulevesien määrälliselle hallinnalle.

Mitoitussade	Hajautettu hallintajärjestelmä	Keskitetty hallintajärjestelmä
Sateen todennäköisyys	20 %	10-33 %
Sateen toistuvuus	1/5 a	1/3-1/10 a
Sadetapahtuma	10 min	pinta-alasta riippuen
	10 mm	
Esimerkki rakenteesta	kiinteistö- tai korttelikohtainen rakenne kuten viivytyks- tai imeytyspaine	viheralueella sijaitseva viivytyksallas tai lampi

Kiinteistö tai korttelikohtaiset viivytyksratkaisut mitoitetaan 10 min rankkasateelle, jonka aikana sataa vettä noin 10 mm. Mitoitussade toistuu kerran viidessä vuodessa. Keskitetyissä järjestelmissä mitoitussateen valintaan vaikuttaa tulvimisen aiheuttamien riskien vaikutukset. Ohjeellinen toistuvuus mitoitussateelle on kerran 3-10 vuodessa. (Kuntaliitto 2012).

3.3.1 Viivytyksrakenteet

Hulevesien viivytyksellä pyritään pitämään alueelta purkautuva hulevesivirtaama nykyisellä tasolla. Kuntaliiton (2012) ohjeessa muodostuva hulevesimäärä lasketaan kaavalla (5).

$$V = \frac{C \cdot i \cdot A \cdot T}{1000} \quad (5)$$

jossa V on viivytystilavuus [m^3], C on valumakerroin, i on mitoitussateen keskimääräinen intensiteetti [l/s/ha], A on valuma-alueen pinta-ala [ha] ja t on mitoitussateen kesto-aika [s]. Yleensä oletuksena on, että nykytilannetta vastaavalla valumakertoimella laskettu vesimäärää ei viivytetä, jolloin viivytystarve V_{mit} voidaan laskea suunnitellun tilanteen ja nykytilanteen viivytystilavuuksien erotuksena $V_{\text{mit}} = V_{\text{suunniteltu}} - V_{\text{nykytilanne}}$.

Viivytysrakenteiden tulee tyhjentyä yleensä vuorokauden kuluessa viivytystilan täyttymisestä. Suurten viivytysrakenteiden ja imeytysrakenteiden tulisi tyhjentyä 48 tunnin kuluessa. (Kuntaliitto 2012).

Kaikki viivytysrakenteet on varustettava ylivuodolla ja tyhjennysmekanismilla. Järjestelmien mitoituksessa on huomioitava, että viivytysrakenteen läpi johdetaan rakentamista edeltänyt tavanomainen virtaama. (Kuntaliitto 2012).

3.3.2 Maanpäällisen viivytysrakenteen mitoitus

Maanpäällisten viivytysmenetelmien keskimääräinen pinta-alatarve A_L [m^2] lasketaan viivytystilavuuden V_{mit} [m^3] ja vesikerroksen paksuuden h_l [m] perusteella $A_L = V_{\text{mit}} / h_l$. (Kuntaliitto 2012).

Viivytyspainanteessa vesikerroksen ohjeellinen suositussyvyys on 10-25 cm, rakennetuissa altaissa ja kosteikoissa muutamia kymmeniä senttimetrejä. Lammissa vaihtelevan vesikerroksen paksuus on suurimmillaan 1,5 m. Maanpäällistä viivytystilavuutta voidaan hyödyntää myös imeytyspainanteen lammikoitumistilan mitoituksessa. (Kuntaliitto 2012).

3.3.3 Veden viivytys huokostilassa

Imeytys- ja suodatusrakenteissa vettä varastoituu karkearakeisen materiaalin huokostilaan. Vettä varastoivan kerroksen paksuus voidaan mitoittaa kaavalla (6).

$$h = \frac{\left(\frac{V_{\text{mit}}}{n}\right)}{A_p} \quad (6)$$

jossa h on kerrospaksuus, V_{mit} on mitoitusvesimäärä kuutioina [m^3], A_p on alueen pinta-ala [m^2] ja n on materiaalin huokostilavuus. (Kuntaliitto 2012).

Mikäli maa-aineksen vedenläpäisevyyskerroin on noin $1 \cdot 10^{-5}$ ja rakenne ulottuu routarajan alapuolelle, maa-aine ei jäädy umpeen talvella ja rakenne on käytettävissä talvisateiden aikana. Salaojituksella voidaan ehkäistä rakenteen jäätymistä ja nopeuttaa tyhjenemistä. (Kuntaliitto 2012).

Imeytys- ja suodatuskerroksen vedenläpäisevyyskertoimella $k=1 \cdot 10^{-6}$ voidaan käsitellä 1 m^3 hulevesitilavuus 10 m^2 pinta-alalla niin, että rakenne tyhjentyy vuorokaudessa. (Kuntaliitto 2012).

3.4 Tulvareitti

Normaalin hulevesijärjestelmän mitoituksen ylittyttyä hulevedet johdetaan tulvareittiä pitkin alueille, jossa purkautuvista tulvavesistä ei ole haittaa. Tulvareitti voi muodostua esimerkiksi reunakivetystä ajoradasta ja viheralueiden ojista ja painanteista. Tulvareitit ja mahdolliset tulvasuojelurakenteet suositellaan mitoittavaksi 0,5...1 % todennäköisyydelle eli kerran 100:ssa tai 200 vuodessa tapahtuvalle sadetapahtumalle. Hyväksyttävä tulvimisen toistuvuus määräytyy kohteen riskitasosta. (Kuntaliitto 2012).

Tulvareitin mitoituksessa ei yleensä voida huomioida kaikkia ympäristönäkökohtia. Tulvareittien suunnittelussa tulee kuitenkin huomioida suurien vesimäärien ja virtaamien aiheuttamat vaikutukset kuten eroosiohaitat sekä veden laadun heikkeneminen. (Kuntaliitto 2012).

Kiinteistöjen suunnittelussa tulee huomioida sallittu padotuskorkeus. Rakennusmääräyskokoelman D1 (2007) mukaan sade- ja sekaviemäröinnissä padotuskorkeutena pidetään yleensä kadun pintaa +100 mm tonttiviemärin liitoskohdassa. Ympäristön rakenteiden ja tasausten suunnittelussa tulee huomioida veden nousu padotuskorkeuteen niin, ettei vedestä aiheudu haittaa. (Kuntaliitto 2012).

Taulukossa 19 on esitetty 100 vuoden toistuvuudella esiintyviä sateita Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomessa tunnin ja vuorokauden sadantana. (Suomen ympäristökeskus 2010).

Taulukko 19. *Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomen sadannat kerran 100 vuodessa toistuville sateille erikokoisilla valuma-alueilla (Suomen ympäristökeskus 2010).*

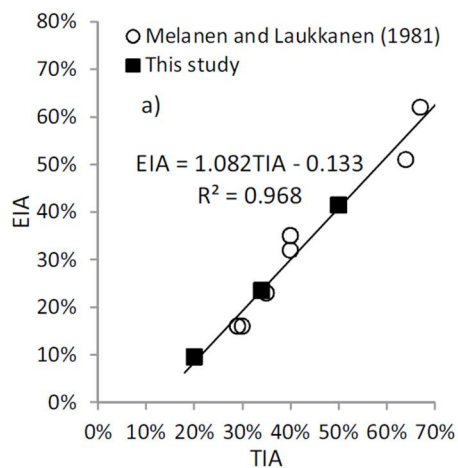
Valuma- alueen koko	Etelä-Suomi (n. 60 – 62°N)		Keski-Suomi (n. 62 – 64 °N)		Pohjois-Suomi (n. 64 – 70 °N)	
	1 h	1 vrk	1 h	1 vrk	1 h	1 vrk
Pistearvo	37 mm	90 mm	36 mm	85 mm	34 mm	80 mm
1 km ²	35 mm	86 mm	34 mm	84 mm	32 mm	80 mm
10 km ²	30 mm	83 mm	29 mm	81 mm	27 mm	77 mm
100 km ²	22 mm	78 mm	21 mm	75 mm	19 mm	71 mm
1000 km ²	13 mm	64 mm	13 mm	62 mm	13 mm	58 mm

3.5 Vaihtoehto viralliselle mitoitusohjeistukselle

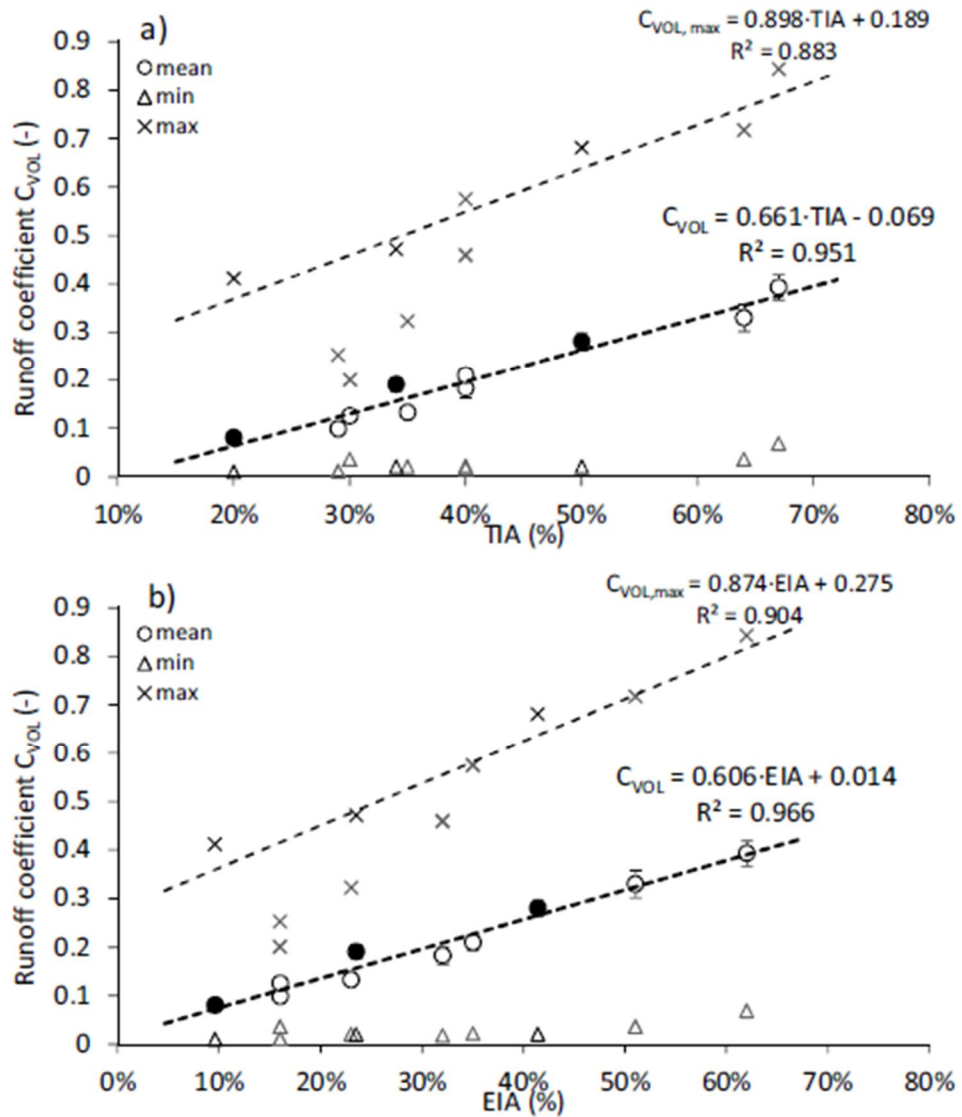
Suomessa taajama-alueiden hulevesien muodostumiseen ja hallintaan liittyvää tutkimusta on tehty vähän. Käytetyt menetelmät hulevesien määrän ja laadun arvioimiseen perustuvat ulkomaisiin tutkimuksiin, joissa maaperän ja ilmaston olosuhteet voivat olla huomattavasti erilaiset Suomen olosuhteisiin verrattuna. Sillanpään (2013) mukaan valuntakertoimet suomalaisissa mitoitusoppaissa ovat korkeita usein toistuvilla sadetapahumille.

Sillanpää (2013) on tutkinut mm. valuma-alueen rakentumisen vaikutusta alueelta välittömästi purkautuvan hulevesivirtaaman muotoon (instant unit hydrograph IUH). Hulevesien määrän ja muodon tuloksia esitettiin valumakertoimina: (i) C_{vol} kuvaa keskimääräistä valumakerrointa, (ii) $C_{vol,max}$ kuvaa huippuvirtaaman valuntakerrointa. Tutkimukset on tehty viiden vuoden aikana kolmelle asuinalueelle Espoossa: pientalo- ja kerrostaloalueelle sekä rakennettavalle asuinalueelle.

TIA (total impervious area) kuvaa läpäisemättömien pintojen osuutta (katot, tiet, parkkipaikat yms.) valuma-alueesta. EIA (effective impervious area) kuvaa kuivatusjärjestelmään hydraulisesti yhdistettyä osaa läpäisemättömästä pinnasta. EIA:n osuus TIA:sta on asuinalueilla 50-80 %. Keskusta-alueella, teollisuusalueilla ja muilla vahvasti läpäisemättömillä alueilla EIA:n osuus on 80-90 % TIA:sta. EIA:n ja TIA:n välinen suhde on esitetty kuvassa 30. Keskimääräiset ja huippuvalumakertoimet TIA:n ja EIA:n suhteen on esitetty kuvassa 31.



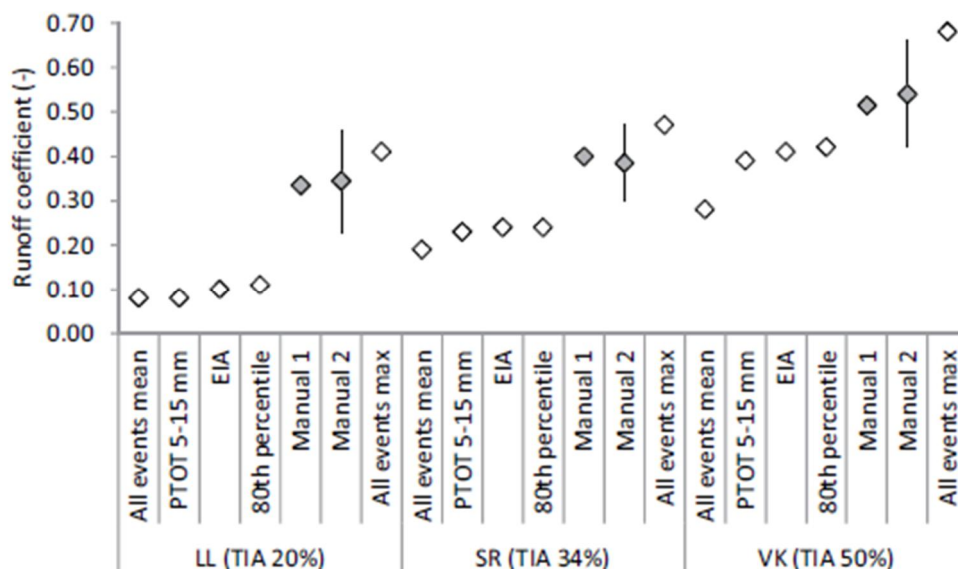
Kuva 30. EIA:n ja TIA:n välinen suhde (Sillanpää 2013).



Kuva 31. Valuma-alueen minimi, keskiarvo ja maksimi valumakertoimet TIA:n (ylhäällä) ja EIA:n (alhaalla) suhteen. Mustat ympyrät kuvaavat Sillanpään tutkimustuloksia ja valkoiset ympyrät Melasen ja Laukkasen (1981) tuloksia. (Sillanpää 2013).

Keskimääräinen valuntakerroin C_{vol} korreloi hyvin sekä EIA:n että TIA:n suhteen. Huippuvirtaaman tuottava valumakerroin $C_{vol,max}$ voi olla moninkertainen keskimääräisen valumakertoimeen C_{vol} verrattuna (Sillanpää 2013).

Sillanpää (2013) määrittä valuma-alueille valumakertoimet erilaisissa sadetilanteissa ja arvoja verrattiin Suomen mitoitusohjeisiin. Vertailun tulokset on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Valumakertoimen vertailu valuma-alueittain. Manual 1 valumakerroin on laskettu Karttunen et al. (2004) mukaan ja Manual 2 on Tielaitoksen (1993) mukainen mitoitus jota käytetään Kuntaliiton hulevesioppaassa (2012). Hulevesioppaan mukaiselle ohjeistukselle laskettiin valumakertoimen vaihteluväli. Kuvassa valkoiset symbolit pohjautuvat mittaustietoon, harmaat ovat kirjallisuusarvoja. (Sillanpää 2013).

Havaitut valumakertoimet usein toistuvilla sateilla ovat huomattavasti mitoitusohjeistuksen mukaisia kertoimia pienempiä. Hulevesioppaan mukaisilla maksimiarvoilla päästiin samansuuruisiin tuloksiin kuin havaitut maksimikertoimet. Mitoitusohjeistus soveltuu siis paremmin tulvan vaikutusten arviointiin kuin tavanomaisten sateiden viivytystarpeen arviointiin. (Sillanpää 2013).

Sillanpää havaitsi sateen määrässä kynnysarvon (17-20 mm), joka vaikutti muodostuvaan hulevesimäärään. Kynnysarvoa pienemmillä sadetapahtumilla hulevesimäärä muodostui lähinnä EIA-alueilta. Sademäärän ylittäessä kynnysarvon, valunnan määrä kasvaa huomattavasti, kun valuntaa alkaa muodostua myös valuma-alueen läpäiseviltä pinnoilta. (Sillanpää 2013).

Tutkimuksen aikaisista sadetapahtumista 80 % jäi havaitun kynnysarvon alapuolelle. Kaupungistumisen vaikutukset olivat suhteellisesti suurimpia tavanomaisilla sateilla. Valuma-alueen rakentuminen yhdenmukaisti valuma-alueelta purkautuvan hulevesivirtaaman muotoa, kasvatti alueelta purkautuvaa huippuvirtaamaa ja nopeutti purkautumisaikaa valuma-alueelta. (Sillanpää 2013).

Sillanpään tutkimusten perusteella kaupungistumisen aiheuttamia hydrologisia ja vedenlaadullisia vaikutuksia pystytään estämään ja lieventämään kohdentamalla hulevesien imeytys, viivytys ja käsittely tavanomaisiin sadetapahtumiin (sademäärä <16 mm), joka vastaa noin 80 % sadetapahtumista. Valuntakerroin saadaan määrittämällä valuma-alueen EIA. EIA voidaan määrittää TIA:n ja kuvan 30 kaavan perusteella. Kynnysarvoa suuremmilla sadetapahtumilla muodostuvat hulevedet hallitaan tulvareittisuunnittelun

avulla. Tulvareittisuunnittelussa voidaan käyttää nykyisiä valumakertoimia. (Sillanpää 2013).

Taulukkoon 20 on koottu 5-60 minuutin sadetapahtumissa muodostuvat sademäärät hulevesioppaan (Kuntaliitto 2012) mukaisilla sateen intensiteeteillä.

Taulukko 20. *Hulevesioppaan mukaisten mitoitussateiden sademäärät (mm). Sadetapahtumat joissa sademäärä on yli 16 mm on lihavoitu. Taulukossa k on sadetapahtuma, jossa on huomioitu kasvihuoneilmiön vaikutus ja n on nykytila.*

Toistuvuus	5 min		10 min		15 min		30 min		60 min	
	n	k	n	k	n	k	n	k	n	k
1/1a	3,5	4,2	4,8	5,8	7,1	8,4	6,0	10,8	12,0	14,4
1/2a	5,0	6,0	7,2	8,6	9,0	10,8	7,5	13,2	15,0	18,0
1/3a	5,5	6,6	7,8	9,4	10,1	12,0	8,4	15,6	16,8	20,4
1/5a	6,5	7,8	9,0	10,8	11,0	13,2	9,6	18,0	19,2	22,8
1/10a	7,0	8,4	10,8	13,0	14,1	16,8	11,4	21,6	22,8	27,6

Sillanpään (2013) havainnoima kynnysarvo mahdollistaa lyhykestoisten sateiden käsittelyn nykyisellä mitoituksella. Kynnysarvo 16 mm ylittyy nykyisellä sateen intensiteeteillä joka kolmas vuosi toistuvalla tunnin kestoisella sateella. Kasvihuoneilmiön vaikutuksesta 16 mm sademäärä saavutetaan 1/10a toistuvuudella jo 15 minuutin sateella ja 1/2a toistuvuudella 60 minuutin sadetapahtumalla. Myöhemmissä kappaleissa Sillanpään esittämää EIA:han ja 16 mm sateeseen perustuvaa mitoitusta kutsutaan EIA-menetelmäksi.

4. HULEVESIEN HALLINNAN TARVE

Hulevesien hallinnan tarve voi aiheutua havaituista hulevesien haittavaikutuksista (tulviminen, eroosio, vedenlaadun heikkeneminen), uuden alueen kaavoituksesta, uudis- tai täydennysrakentamisen suunnittelusta, laajennus- tai saneeraustarpeesta, kuivatuksen tehostamisesta tai varautumisesta tavanomaista suurempia sateita varten.

Asemakaava-alueella kunta vastaa hulevesien hallinnan järjestämisestä, mutta kiinteistön omistaja ja/tai haltija vastaa kiinteistöltä muodostuvista hulevesistä. Asemakaava-alueen ulkopuolella vastuu on kiinteistön omistajalla. (MRL 1999). Vastuut ja velvollisuudet sekä hulevesien yhteys suunnitteluun on esitetty luvuissa 2.1. ja 2.2.

Tulviminen voi aiheutua liian pienen kapasiteetin lisäksi kunnossapidon laiminlyönnestä. Rummut ja putket voivat olla jäässä tai hiekka, roskat ja kasvillisuus voivat tukkia putkia, uomia ja rumpuja. Esimerkiksi laskuojien huono kunto voi vaikuttaa pahimmillaan koko väylän kuivatuksen toimimiseen. (Liikennevirasto 2013).

Havaittua tulvahaittaa korjattaessa, varsinkin jos syyn oletetaan johtuvan liian pienestä kapasiteetista, on muistettava tarkastella johtamisjärjestelmää riittävän pitkälle alavirtaan. Tulviminen voi johtua kauempana alajuoksulla olevasta padottavasta rummusta tai linjaosuudesta. Vaikka haitallinen padotus muodostuisikin heti padottavan linjaosuuden kohdalle, linjakohdan kapasiteettia parannettaessa on varmistettava että järjestelmä pysyy johtamaan kasvavan virtaaman purkupisteeseen asti. Muuten tulvimiskohta vain siirretään järjestelmässä eteenpäin. Johtamisjärjestelmän kapasiteettia kasvatettaessa tarkastelu tulee jatkaa aina purkupisteeseen asti tai kohtaan johon kasvanut virtaama voidaan purkaa ilman haittavaikutuksia.

Kapasiteettia voidaan parantaa putkikoon tai uoman kasvattamisen sijaan viivytysrakenteella. Kapasiteetin ylittävä osuus vedestä johdetaan järjestelmän ylivuotona viivytysrakenteeseen. Kun linjaan vapautuu kapasiteettia, vesi johdetaan viivytysrakenteesta takaisin hulevesijärjestelmään joko viettana tai pumppaamalla. Viivytysrakennetta ei tarvitse sijoittaa juuri kapasiteettia rajoittavaan kohtaan – kunhan viivytysrakenne vapauttaa riittävästi kapasiteettia tilanteen ratkaisemiseksi.

Tulvimisesta aiheutuvia haitallisia vaikutuksia voidaan vähentää rakentamalla verkostoon ylivuotoja kohtiin, joista poikkeuksellisten sateiden aiheuttamat vesimäärät eivät aiheuta haittaa.

5. HULEVESIEN HALLINTA MALLINTAMALLA

Ensimmäiset hulevesien määrää ja laatua simuloivat mallit kehitettiin 1970-luvulla, jonka jälkeen malleja on kehitetty jatkuvasti. Verkostomallinnus on nykyaikainen keino hulevesiviemäreiden hydraulisen toiminnan tutkimiseen. Mallinnuksessa sade, valunta ja virtaama pyritään esittämään numeerisina, laskentaohjelmiin sovitettuina teorioina. (Zoppou 1999). Mallinnusohjelma koostuu yleensä hydrologisesta valuma-aluemallista ja hydraulisesta verkostomallista. Valuma-aluemalli kertoo kuinka paljon hulevettä muodostuu ja verkostomalli laskee huleveden virtauksen johtamis- ja käsittelyjärjestelmissä. (Kuntaliitto 2012).

Mallit voivat olla tapahtumamalleja, joissa tarkastellaan yksittäisiä sadetapahtumia tai jatkuvan prosessin malleja, jotka simuloivat pitkän aikavälin vesitasetta aina kuukausista vuosiin (Zoppou 1999). Mallinnuksen tuloksena saadaan ajan suhteen muuttuva hulevesivirtaama mistä tahansa kohdasta järjestelmää. Mallintamalla voidaan tarkastella yhden tai useamman valuma-alueen käyttäytymistä, hulevesivirtaaman muodostumista, mitoittaa hulevesilinjoja tai viivytysrakenteita. Mallinnusta voidaan käyttää myös vedenlaadun määrittämiseen. (Kuntaliitto 2012, Rossman 2010).

Mallintamisella saadut tulokset ovat suuntaa-antavia, koska yleensä suunnittelualueesta ei ole saatavilla riittävän tarkkaa lähtötietoa esimerkiksi alueiden pintavaluntaolosuhteista. Lisäksi kalibrointi on hankalaa, koska suunnittelualueelta ei yleensä ole saatavilla mitattua aineistoa sadannasta tai muodostuvista hulevesivirtaamista. (Kuntaliitto 2012).

Mallin rakentamisen jälkeen itse tarkastelujen tekeminen on hyvin nopeaa, mikä mahdollistaa useiden sadetapahtumien vaikutusten selvittämisen. Vastaavasti tulva- tai häiriötilanteiden tarkastelut on nopea tehdä mallinnuksen avulla. Ilman mallinnusta on lähes mahdotonta osoittaa kaikki verkoston pisteet, joissa tulvimista tapahtuu. (Kuntaliitto 2012).

Kuntaliiton hulevesioppaassa (2012) suositellaan mallinnuksen käyttöä aina, kun kyseessä on useamman osavaluma-alueen tai johtolinjan muodostaman järjestelmän tarkastelu.

5.1 Mallinnuksen vaiheet

Mallinnusta aloitettaessa sovitaan yhdessä sidosryhmien kanssa mitä halutaan mallintaa, millä tarkkuudella ja mitä tarkoitusta varten. Mallilta vaaditaan eri asioita, jos tarkastellaan erilaisia vaihtoehtoja poliittisen päätöksenteon pohjaksi, tai jos mallinnusta tehdään

rakennussuunnittelua varten. Mallinnuksen lähtökohdat vaikuttavat muun muassa käytettävään malliin, valittaviin laskentamenetelmiin, aluerajauksiin, aikaskaalaan, tarkasteltaviin skenaarioihin sekä tarvittavien lähtötietojen määrään ja laatuun. Kun tiedetään mitä halutaan mallintaa, valitaan tarkoitukseen sopiva mallinnusohjelma ja laskentamenetelmät. (Van Waveren ym. 1999).

Itse mallinnus koostuu seuraavista vaiheista: lähtötietojen hankkiminen, valuma-alue selvitys, hydrologisen mallin ja verkostomallin luominen tietokoneelle, mallin kalibrointi, laskenta-ajot mallilla halutuissa tilanteissa, tulosten kerääminen halutuista tarkastelupisteistä sekä tulosten analysointi ja johtopäätösten teko. Mallinnusta varten joudutaan tekemään yksinkertaistuksia niin hydrologiseen malliin kuin verkostomalliin. Yksinkertaistuksia tehdessä on huolehdittava, ettei niiden vaikutus kokonaistulokseen muodostu merkittäväksi. (RIL 237-2-2010).

5.2 Käyttö

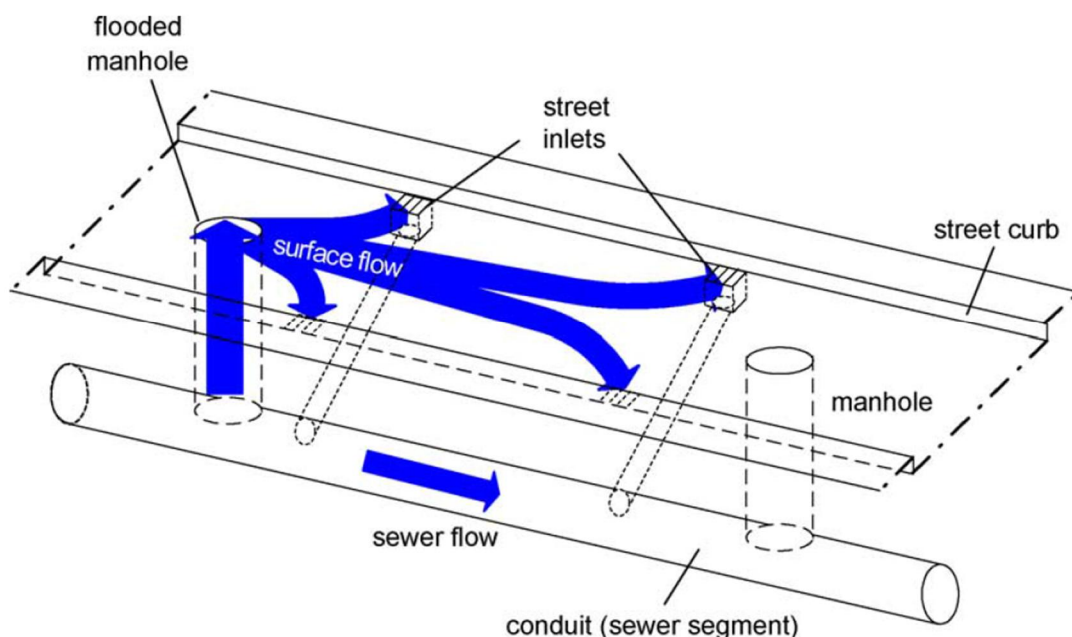
Mallinnusohjelmia käytetään uusien järjestelmien suunnittelemiseen ja nykyisen verkoston analysoimiseen. Suunnittelussa uusien verkosto-osuuksien fyysiset ominaisuudet (kaltevuus, halkaisija) määritetään niin, että järjestelmä pystyy johtamaan halutulla mitoitustilanteella muodostuvat virtaamat. Nykyisen järjestelmän analysoinnissa mallinnuksella selvitetään järjestelmän kapasiteetin riittävyyttä tai toimintaa tietyissä olosuhteissa. Yleensä pyritään selvittämään tarvitseeko nykyistä järjestelmää parantaa. (Buttler & Davies 2004).

Mallinnusta voidaan hyödyntää kehittämissuunnitelmien, saneeraussuunnitelmien, hulevesitulvariski arviointien ja yleissuunnitelmien laadinnassa. Mallinnuksella voidaan etsiä järjestelmän pullonkaulakohtia, tulvimiskohtia sekä suunnitella tulvahaittoihin ratkaisuja. Mallinnuksella voidaan tarkastella kaavoituksen aiheuttamaa vaikutusta nykyiseen verkostoon tai nykyisen verkoston kapasiteettia kestää ilmastonmuutoksen vaikutukset. Erilaiset riski- ja vahingonvaaratarkastelut ovat myös mahdollisia. Mallinnusta voidaan käyttää myös yksittäisten kohteiden, kuten uusien putkilinjojen, pumppaamoiden, tasausaltaiden, ylivuotojen tai muiden rakenteiden hydrauliseen mitoittamiseen. (RIL 237-2-2010, Rossman 2010).

Mallinnusta voidaan hyödyntää myös veden laadun arviointiin. Mallinnuksen avulla voidaan arvioida esimerkiksi vesistöön johdettavaa kuormitusta tai haitta-aineen kulkumista hulevesiverkostossa. (Rossman 2010).

5.3 Tulvimisen mallinnus

Tiheillä kaupunkialueilla voidaan olettaa, että suurin osa tulvivasta vedestä virtaa katurakenteita pitkin (Mignot et al. 2006). Djordevic et al. (1999) esitteli ns. dual drainage -mallinnustilanteen, joka huomioi paineellisen putkivirtaaman ja kaivoista purkautuvan pintavirtaaman välisen vuorovaikutuksen. Menetelmä on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Dual drainage -menetelmä mallinnuksessa huomioi pintavirtaaman ja paineellisen putkivirtaaman välisen vuorovaikutuksen (Djordjevic et al. 1999).

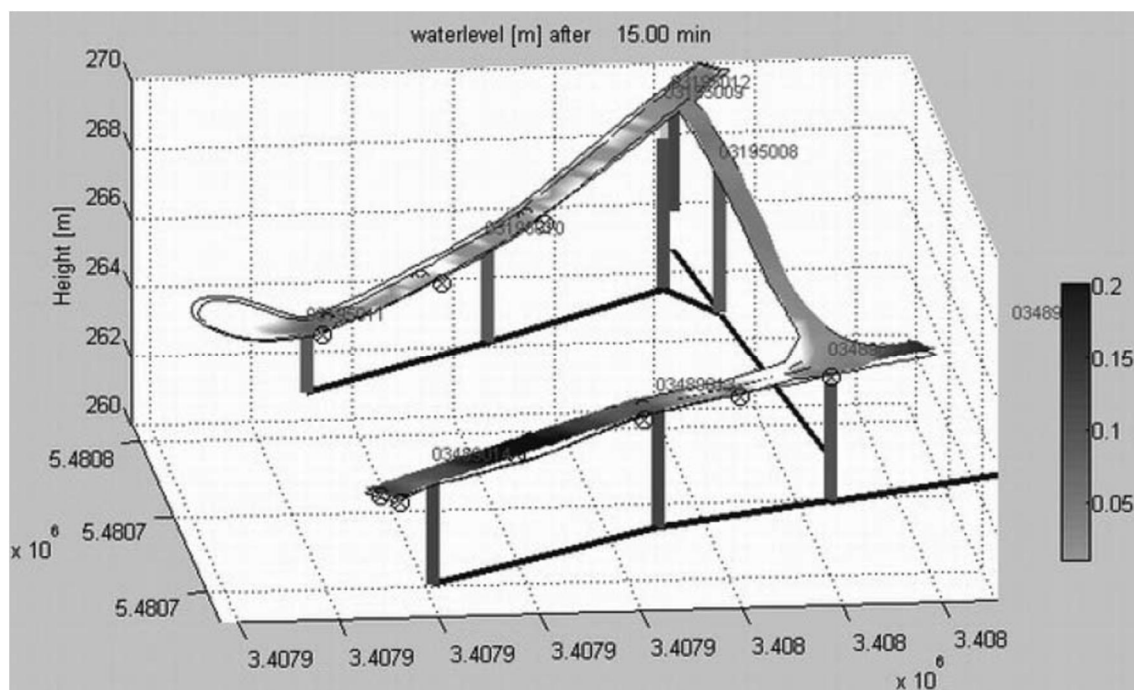
Tulvimista mallinnettaessa käytettävän mallin tulee pystyä laskemaan (Schmitt et al. 2004):

- siirtymä vapaasta virtaamasta paineelliseen virtaamaan
- vedenpinnan nousu maanpinnan yläpuolelle aiheuttaen veden valuntaa
- pintavalunnan muodostuminen tulvimistilanteessa ja
- pintavaluntana etenevän virtaaman ja paineellisen putkivirtaaman välisen vuorovaikutuksen.

Dual drainage -mallinnuksessa pinnoista annetaan lisätietoja, kuten (i) rakenne, joka yhdistää pinnan viemärijärjestelmään sekä (ii) virtaamaa johtavan pinnan ominaisuudet. Esimerkiksi kaduilta vedet voidaan johtaa erilaisten kaivorakenteiden kautta virrata verkostoon ja tulvimistilanteissa hulevedet voivat virrata katurakennetta pitkin seuraavalle kaivolle. (Schmitt et al. 2004).

Maanpäällistä virtaamaa voidaan mallintaa 1-ulotteisessa mallinnuksella rakentamalla katu vastaava poikkileikkaus malliin avouomana (Mark et al. 2004; Gironas et al. 2009). 2-ulotteisessa mallinnuksessa pintarakenteiden ominaisuudet esitetään tarkem-

min, esimerkiksi kolmioimalla katurakenteen korkeustiedot (Schmitt et al. 2004). Esimerkki 2-ulotteisesta mallinnustuloksesta on kuvassa 34.



Kuva 34. Vedenpinnankorkeus 2-ulotteisessa mallinnuksessa (Schmitt et al. 2004).

Pintavirtaaman mallinnus puutteellisten katurakenteen tietojen vuoksi muodostaa mo-
lemmissa mallinnustavoissa laskennan suurimman epätarkkuuden (Mark et al. 2004,
Schmitt et al. 2004). Katurakenteen monimutkaisuus risteyskohdissa aiheuttaa vaikeuk-
sia mallinnukselle varsinkin 1D-mallinnuksessa. Myös järjestelmien välisenä linkkinä
toimivien kaivojen yksinkertaistus aiheuttaa oman virhelähteensä. (Mark et al. 2004).

5.4 Epävarmuustekijät ja virheet mallissa

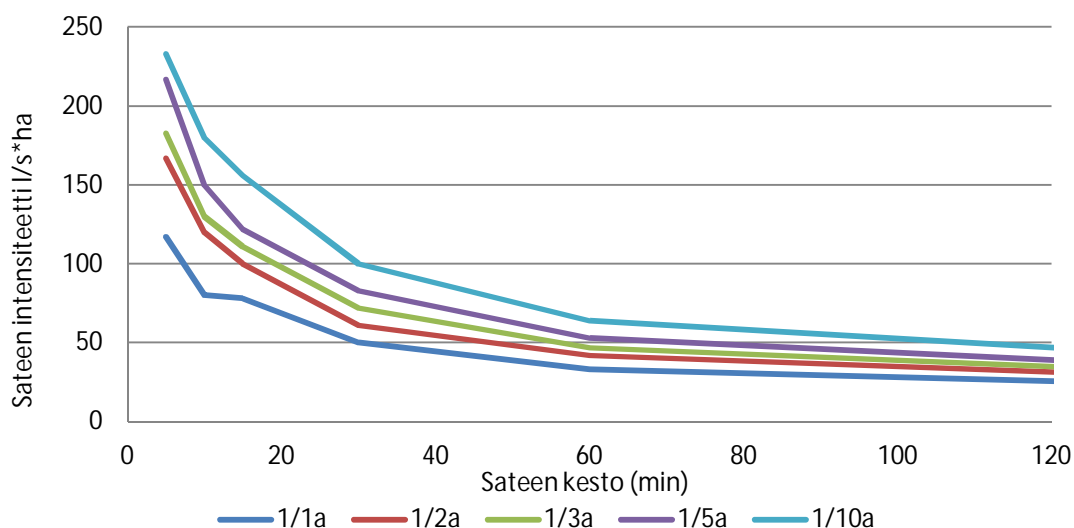
Epävarmuutta voi esiintyä niin mallinnuksen lähtötiedoissa, järjestelmässä, vaikutusten
arvioinnissa kuin tulevan kehityksen ennustamisessa. Lähtötiedon epävarmuudet voivat
johtua havainnoista ja mittauksista. Järjestelmän tiedot perustuvat yleensä viemäreiden
muodon, mittojen ja asennuksen osalta olemassa olevaan tietoon. Mallinnuksen virheet
jakautuvat kolmeen ryhmään: mallin rakenteellisiin virheisiin, parametrien virheisiin ja
laskennan aikaisiin virheisiin. (Aaltonen et al. 2008).

Mallin kalibrointi ja validointi vaatii sadannan ja valunnan havaintoja vähintään kuuden
sadetapahtuman osalta valuma-alueen olennaisista kohdista. Empiirisiin algoritmeihin
perustuvien mallien osalta kalibroinnin tarve korostuu. Kalibrointi tulee suorittaa sitä
suuretta vastaan, josta havainnot on tehty. (Aaltonen et al. 2008).

5.5 Sadanta

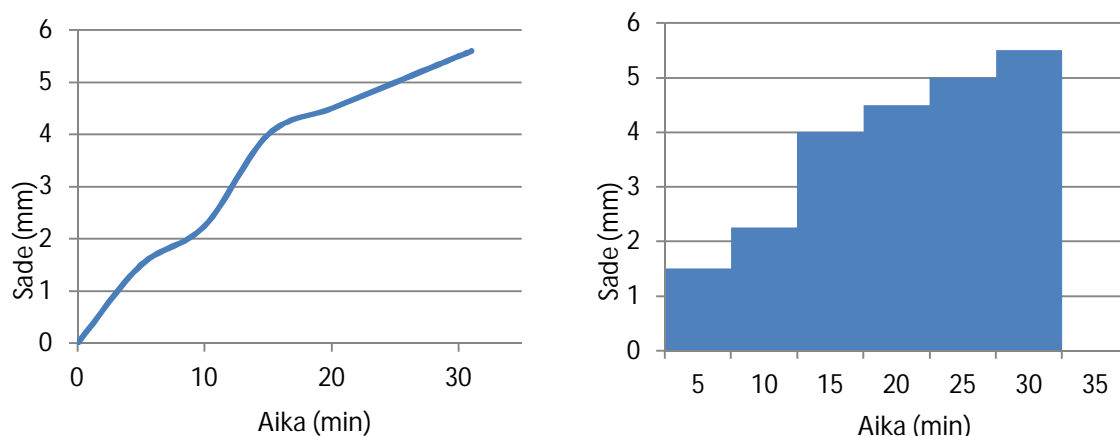
Hydrologinen tapahtuma alkaa aina sateesta. Mallinnuksessa käytettävä sade voi olla yksittäinen sadetapahtuma tai koostua useammasta peräkkäisestä sateesta. Sade voi olla tasaista tai sen intensiteetti voi muuttua ajan suhteen. (Kuntaliitto 2012). Mallinnettava sade voidaan jakaa kolmeen luokkaan: tasainen sade, dynaaminen sade ja synteettinen sade. (Brown et al. 2009).

Vaikka sateen intensiteetti vaihtelee, monet huippuvirtaaman määrittämiseen perustuvat mallinnusmenetelmät perustuvat tasaiseen sateeseen. Sadetapahtumista voidaan luoda intensiteetti-kesto-toistuvuus-käyrä IDF (Intensity-Duration-Frequency). IDF-käyrä on yhteenveto sateen toistuvuudesta, kestosta ja intensiteetistä ajan suhteen. (Brown et al. 2009). Esimerkki IDF-käyrästä on kuvassa 35.



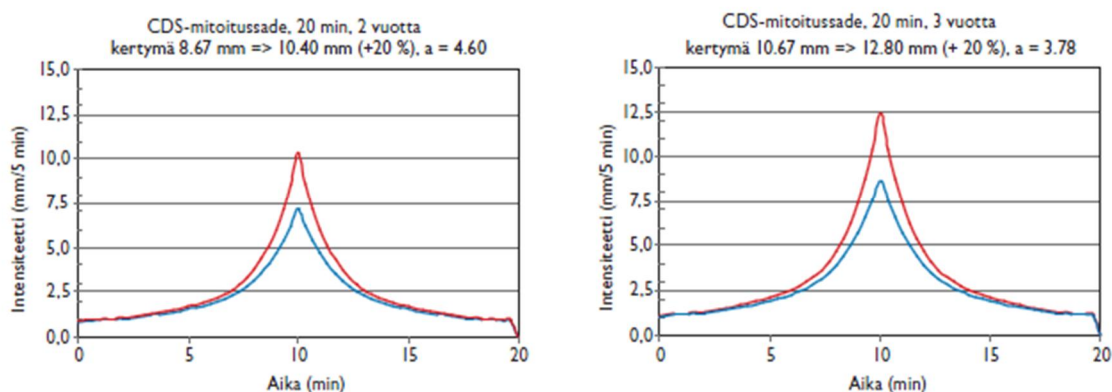
Kuva 35. Intensiteetti-kesto-toistuvuus -käyrä (IDF). Käyrä on laadittu hulevesioppaan mukaisten mitoitusasteiden intensiteetin (taulukko 8). Mitoitusasteet perustuvat keskimäärin noin 1 km²:n aluesadannalle Etelä-Suomessa kun kasvihuoneilmiön vaikutusta ei ole huomioitu. (Kuntaliitto, 2012).

Sadetapahtuma voidaan kuvata oikeiden mittaustietojen perusteella. Mitattu sade esitetään yleensä kumulatiivisena sademääränä ajan suhteen. Mallinnuksessa sateen intensiteetin muutos jaetaan aikaväleihin. Keskimääräinen sateen intensiteetti lasketaan jokaiselle aikavälille. Tulosten perusteella muodostuu hyetografi (kuva 36). (Brown et al. 2009). Hyetografi on tarkempi kuvaus sateesta kuin IDF-käyrä, koska se huomioi sateen intensiteetin vaihtelun. Hyetografeja käytetään malleissa, jotka perustuvat valuntakäyriin. (Brown et al. 2009).



Kuva 36. Kumulatiivinen sade (vasemmalla) ja hyetografi (oikealla). (mukailtu Brown et al. 2009).

Mallinnukset perustuvat yleensä keinotekoisiiin sateisiin, jotka on muokattu vastaamaan alueen sadantaa (Brown et al. 2009). Tunnettu keinotekoinen sateenmuoto on ns. CDS-sade (Chicago Design Storm). Rankkasateet- ja kaupunkitulvat (2008) raportissa on määritetty Suomen mitoitusasteisiin sovitettut 20 minuutin CDS-sateet 2 ja 3 vuoden toistuvuudella nykyilmastolla ja tulevalla ilmastolla (kuva 37).



Kuva 37. Suomen mitoitusasteisiin sovitettut CDS-sateet nykyilmastolla (sininen) ja tulevalla ilmastolla (punainen), jossa sateen kertymän on oletettu kasvaneen 20 %. (Aaltonen et al. 2008).

5.6 Valunta

Sadannan ja valunnan välistä yhteyttä on hahmoteltu 1800-luvun lopulta lähtien. Ensimmäisenä julkaistiin rationaalinen menetelmä (kaava 1), johon Suomen mitoitusohjeistus edelleen perustuu. 1930-luvulla Horton esitti hulevesien muodostumisesta teorian perustuen maan imeyntäkapasiteetin ylittymiseen ja Sherman laati nk. yksikkövaluntakäyrän, jossa sadetapahtumasta muodostetaan valuntakäyrä tehoisan eli valuntaa aiheuttavan sadannan perusteella. (Mustonen 1986). Nämä laskentamenetelmät perustuivat empiirisiin havaintoihin (Zoppou 2001).

1950-luvulla alettiin kehittää matemaattisia malleja kuvaamaan sadantaa ja valumaa. Fysiikan lakeihin perustuvia konseptuaalisia valuntamalleja kehitettiin 1960–1970-luvuilla. (Mustonen 1986).

Valunnan mallinnusta varten tarkasteltavaa aluetta joudutaan aina yksinkertaistamaan. Rankkasateiden aikana haihdunta voidaan yleensä olettaa merkityksettömäksi (Buttler & Davies 2004, Kuntaliitto 2012). Useissa menetelmissä valuma-alueet oletetaan mal-
leissa homogeenisiksi tai sateen oletetaan olevan tasaista.

Käyttötarkoitus vaikuttaa mallinnuksessa käytettäviin laskentamenetelmiin. Valuma-alueelta muodostuvaa huippuvirtaamaa käytetään hulevesien johtamisjärjestelmien mitoitusperustana. Jos tarkastellaan veden viivytystä tai monimutkaisia verkostorakenteita, laskentamenetelmällä tulee pystyä laatimaan virtaamakäyrä ajan suhteen halutusta tarkastelupisteestä. (Brown et al. 2009). Hulevesioppaassa (Kuntaliitto 2012) ei ole annettu ohjeistusta mallinnuksessa käytettävien laskentamenetelmien valintaan.

Luvuissa 5.6.1-5.6.7 on esitetty erilaisia laskentamenetelmiä sateen häviöiden, kuten imeynnän tai suoraan valunnan laskentaan.

5.6.1 Horton

Empiirisessä Hortonin kehittämässä menetelmässä imeytyminen alkaa tietyltä tasolta ja vähenee eksponentiaalisesti kunnes saavuttaa kyllästyneen maan imeytymistason. Imeytymiskyvyn ylittävistä sademäärästä muodostuu pintavaluntaa. Menetelmässä imeytyminen esitetään ajan funktiona (7).

$$f_p = f_f + (f_0 - f_f)e^{-mt}. \quad (7)$$

jossa f_0 ja f_f ovat imeytymisnopeuksia [mm/h] alku- ja lopputilanteessa, t on aika sateen alkamisesta. Kaavan m on vakio, joka kuvaa imeynnän vähentymistä. (Karamouz et al. 2010). Parametrit f_f , f_0 ja m voidaan määrittää mittauksilla. Kertoimille on myös annettu taulukoituja arvoja (taulukko 21). Arvot eivät kuitenkaan ole ”yleisesti sovittuja” vaan perustuvat arvioon.

Taulukko 21. Esimerkkejä Horton-menetelmän parametreista (Karamouz et al. 2010).

Maankäyttö	f_0	f_f	m
	mm/h	mm/h	1/s
Rakennettu alue – heikko tai epävarma imeytyvyys	6	3	0,0005
Luonnontilainen – heikko tai epävarma imeytyvyys	9	3	0,0001
Luonnontilainen – melko hyvä imeytyvyys tai parempi	12,5	6,25	0,00005
Rakennettu alue – melko hyvä imeytyvyys tai parempi	9	3	0,0005

Mustosen (1986) mukaan Hortonin teoria ei päde Suomen olosuhteissa, koska sadannan intensiteetti ylittää erittäin harvoin maan imeyntäkapasiteetin.

5.6.2 Green ja Ampt

Käytetyin fysiikkaan perustuva numeerinen imeyntämalli on Greenin ja Amptin kehittämä menetelmä vuodelta 1911. Menetelmä perustuu oletukseen, että sateen alussa läpäisevän maanpinnan alapuolella on selkeä, tasainen kostumisrintama. Sateen imeytyessä maaperään kosteusrintama liikkuu ja kosteusrintaman paksuus kasvaa, samalla imeyntä hidastuu. Yhtälössä kostumisrintaman alapuolella kyllästymisaste ja hydraulinen johtavuus ovat vakioita. Imeyntä on esitetty yhtälössä (8). Menetelmä perustuu Darcyn lakiin. (Karamouz et al. 2010).

$$f = \frac{dF}{dt} = -K_s \left(\psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{F} + 1 \right) \quad (8)$$

jossa f on imeyntänopeus [cm/s], K_s on vedellä kyllästyneen maakerroksen hydraulinen johtavuus [cm/s], ψ_f on kapillaarinen nousukorkeus [cm], θ_s on kyllästyneen maaperän vesipitoisuus [-], θ_i on vesipitoisuus tarkastelun alussa [-] ja F on maaperän imeytynyt vesimäärä [cm] (kumulatiivinen). Menetelmää varten on taulukoitu parametrien arvoja (taulukko 22). Taulukoituja arvoja tulee käyttää vain jos mittaustietoa ei ole saatavilla. (Karamouz et al. 2010).

Taulukko 22. *Green ja Ampt -menetelmän kertoimia eri maalajeille (Karamouz et al. 2010). Taulukossa η on huokoisuus, θ_e on tehokas huokoisuus, ψ_f on kapillaarinen nousukorkeus ja K on hydraulinen johtokyky.*

Maalaji	η [-]	θ_e [-]	ψ_f [mm]	K [mm/h]
Hiekka	0,437	0,417	49,5	117,8
Hiekkainen siltti	0,453	0,412	110,1	10,9
Hiesu	0,463	0,434	88,9	3,4
Hiekkapitoinen savi	0,430	0,321	239,0	0,6
Savi	0,475	0,385	316,3	0,3

5.6.3 Rationaalinen menetelmä

Rationaalinen menetelmä perustuu valuma-alueelta muodostuvan huippuvirtaaman määrittämiseen valuma-alueen pinta-alan, valumakertoimen ja sateen intensiteetin perusteella. (Brown et al. 2009). Menetelmä on sama kuin kuntaliiton hulevesioppaassa (2012) ja liikenneviraston ohjeessa (2013) esitetty periaate hulevesivirtaaman laskennalle (kaava 1). Menetelmää käytetään edelleen paljon sen yksinkertaisuuden vuoksi.

Rationaalinen menetelmä perustuu seuraaviin oletuksiin (Karamouz et al. 2010):

- sateen intensiteetti on vakio valuma-alueella koko sateen ajan
- sateen intensiteetti tai sateen kesto ei vaikuta valumakertoimeen
- valunta-ajan pituus ei riipu sateen intensiteetistä
- viivytävien muotojen/rakenteiden vaikutusta ei huomioida.

Kaikki em. kriteerit tapahtuvat harvoin luonnossa. Menetelmää voidaan käyttää pienten alueiden tarkasteluun (max 80 ha), koska sateen intensiteetin tulee olla vakio ja sateen keston tulee olla vähintään yhtä pitkä kuin valunta-aika valuma-alueen kauimmaisesta pisteestä purkupisteeseen. (Brown et al. 2009).

Rationaalisella menetelmällä saadut tulokset ovat luotettavampia homogeenisilta alueilta. Suuremmat valuma-alueet kannattaakin jakaa osavaluma-alueisiin luotettavuuden parantamiseksi. (Karamouz et al. 2010).

5.6.4 SCS

Entinen SCS (Soil Conservation Service), nykyinen NRCS (Natural Resources Conservation Services) on kehittänyt empiirisen menetelmän huippuvirtaamien arviointiin pieniltä viemäroidyiltä alueilta. SCS käyränumerenmenetelmässä sateen ja pintavalunnan välinen suhde jaetaan välittömään valuntaan, viipymään ja alkuhäviöihin. Välittömän valunnan perusteella voidaan määrittää huippuvirtaama (kaava 9). (Brown et al. 2009).

$$Q_D = \frac{(P - 0,2S_R)^2}{P + 0,8S_R} \quad (9)$$

jossa Q_D on välittömän valunnan vesikerroksen paksuus [mm], P on vuorokauden sademäärä [mm] ja S_R on viipyvän vesikerroksen paksuus [mm]. Empiiristen tutkimusten perusteella viipyvän vesimäärän osuus on yhteydessä valunnan käyränumeroon CN (curve number). Käyränumero koostuu neljästä maalajiluokasta (kuvaa maaperän imeyntää), maankäyttömuodoista, läpäisemättömän pinnan osuudesta, sateesta ja sadetta edeltäneistä olosuhteista (kuiva-melkokuiva-kostea). Käyränumeroiden arvot vaihtelevat 0-100 välillä. (Brown et al. 2009, Karamouz et al. 2010) Viipyvän vesimäärän paksuus ratkaistaan käyränumeron valinnan jälkeen kaavalla 10 (Brown et al. 2009).

$$S_R = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right). \quad (10)$$

Huippuvirtaaman arviointia varten on kehitetty taulukoita ja kaavioita käyränumeroiden arvioimiseksi. Arvot perustuvat Yhdysvalloissa tehdyille kenttätutkimuksille. (Brown et al. 2009). Käytettäessä SCS-menetelmää tulee huomioida, että menetelmä on empiirinen ja mittaukset on tehty hyvin erilaisissa olosuhteissa kuin Suomessa.

SCS-menetelmästä on myös tehty taulukkopohjainen yksikkövaluntakäyrä ja synteettinen yksikköhäviökäyrä. (Brown et al. 2009). SCS-menetelmän graafista sovellusta kut-

sutaan TR-55 (Technical Release 55) -menetelmäksi. Menetelmä on kehitetty pienille valuma-alueille, jotka sijaitsevat taajama-alueella. (USDA 1986). Sovelluksesta on kehitetty mallinnusohjelma TR-55 vuonna 1975. Vuoden 1998 päivityksen jälkeen ohjelmaa on kutsuttu myös nimellä WinTR-55 (USDA 2009).

TR-20 (Technical Release 20) on sadanta-valunta simulointiin kehitetty tietokoneohjelma vuodelta 1965. Ohjelma muodostaa valuntakäyriä valuma-alueilta ja johtaa virtaamat kanavien ja allasrakenteiden kautta. Huippuvirtaamat, huippuvirtaamien ajankohdat, vedenpinnankorkeudet ja kestot voidaan laskea halutuista kohdista uomaverkosta. (USDA 2014). Vuoden 1992 päivityksen yhteydessä ohjelma on kutsuttu myös nimellä WinTR-20. (USDA 2004).

Molemmat alkuperäiset laskentaohjelmat, TR-20 ja TR-55, ovat SCS:n kehittämiä. NRCS on jatkanut ohjelmien kehittämistä. Esimerkiksi mallinnusohjelmien hydraulisia laskentamenetelmiä on päivitetty 2010-2011. (USDA 2014).

5.6.5 Yksikkövaluntakäyrä

Yksikkövaluntakäyrä UH (unit hydrograph) kuvaa sateesta aiheutuvaa suoraa valuntaa purkupisteeseen. Valuntakäyrä kuvaa virtaaman muutosta purkupisteessä ajan suhteen. (Karamouz et al. 2010).

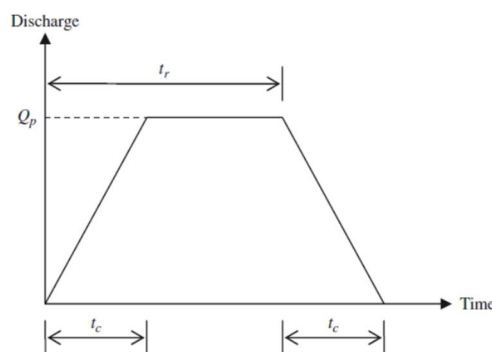
Yksikkövaluntakäyrä on kehitetty sateen aiheuttaman ylivalunnan määrittämiseksi tapauksissa, joissa sadehavaintoja on melko pitkältä ajalta, mutta virtaamahavaintojakso on lyhyt. Menetelmä perustuu oletukseen, että välitön valunta on (i) kestoaltaan ja intensiteetiltään muuttumaton, (ii) lineaarista ja (iii) yhteenlaskettavaa. Eli sateen intensiteetin ei oleteta vaikuttavan huippuvirtaaman esiintymisajankohtaan, eikä valunta-aikaan kaukaisimmasta pisteestä purkupisteeseen. Sateen intensiteetti ja valuntakäyrän muoto suhtautuvat toisiinsa tehoisten sadantojen mukaisessa suhteessa ja usean sateen aiheuttama kokonaisvalunta saadaan laskemalla yksittäisten sateiden valunnat yhteen. (Mustonen 1986).

Yksikkövaluntakäyrä muodostetaan virtaamahavaintojen perusteella tarkastelu aikaa vastaavalle sademäärälle. Tästä virtaamakäyrästä voidaan muodostaa minkä tahansa sateen aiheuttama virtaamakäyrä. (Mustonen 1986). Rossmanin (2010) mukaan yksikkövaluntakäyrää ei tule käyttää 2600 km² suuremmille valuma-alueille.

Yksikkövaluntakäyrästä on tehty useita sovelluksia. (Karamouz et al. 2010). Yksikköhäviökäyrämentelmän kehitti Snyder vuonna 1938. **Snyderin yksikkövaluntakäyrä** perustuu yritys-erhdys pohjaiseen arvojen muokkaukseen. Ensin osalle ordinaatoista annetaan alkuarvot, jota seuraa yritys ja erhdys perusteinen arvojen muokkaus. Yksikkövaluntakäyrä on valmis, kun tilavuus vastaa yhden tuuman vesikerroksen virtaamaa. (Mays 2001).

Clarkin yksikkövaluntakäyrän muodostamista varten määritetään peräkkäisiä pinta-aloja, jotka ovat ajan suhteen yhtä etäällä purkupisteestä. Pinta-alojen määrittäminen on aikaa vievä prosessi. Tulokseksi saadaan diagrammia ajan ja pinta-alan suhteen, jonka perusteella muodostetaan yksikkövaluntakäyrä. Clarkin yksikkövaluntakäyrämenetelmää käytetään HEC-1 -mallinnusohjelmassa. Mallinnusohjelmassa diagrammin sijaan käytetään kertoimia. (Mays 2001).

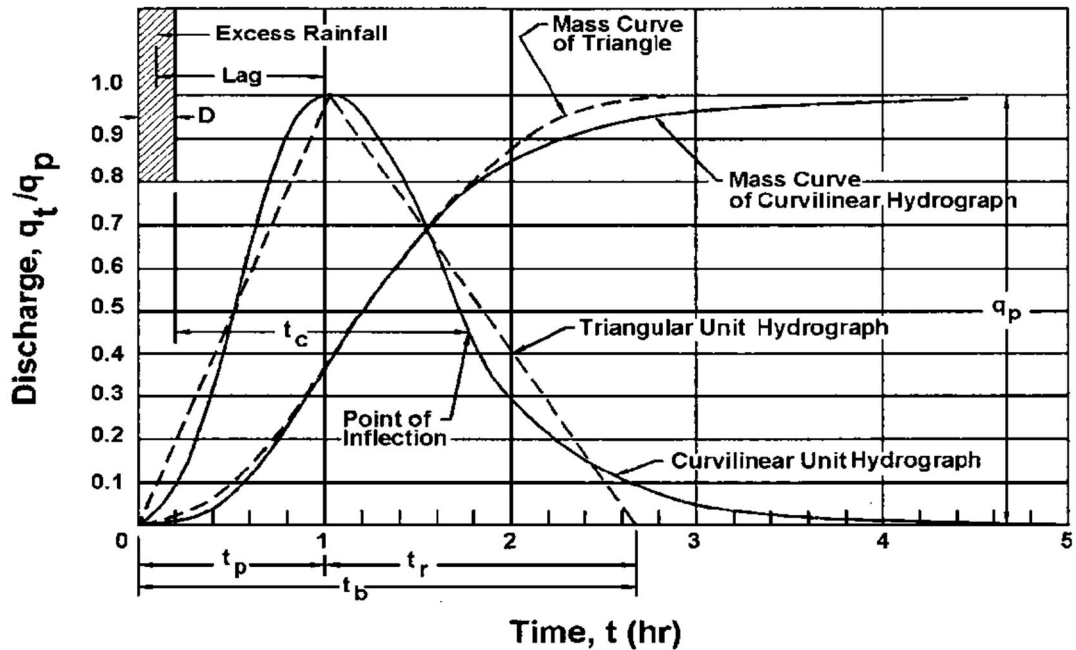
Sovellettu rationaalinen menetelmä on rationaalisesta menetelmästä kehitetty sovellys, joka mahdollistaa virtaamakäyrän laadinnan purkupisteessä. Virtaamakäyrä laaditaan kolmen tekijän perusteella: sateen keston t_r , valunta-ajan t_c ja huippuvirtaaman Q_p . Esimerkki virtaamakäyrästä on kuvassa 38. Huippuvirtaama lasketaan rationaalisella menetelmällä (kaava 1). (Goswami 2012).



Kuva 38. Sovelletun rationaalisen menetelmän yksikkövaluntakäyrä (Goswami 2012).

Valunta-aika t_c arvioidaan yleensä maanpäällisen virtausajan perusteella esimerkiksi kinemaattisella aaltoyhtälöllä. Jos virtausreitistä osa on uoma- tai putkivirtausta, tulee tämä huomioida valunta-ajan arvioinnissa. (Karamouz et al. 2010). Valunta-ajan ratkaisumenetelmiä on esitetty luvussa 5.10.

SCS UH on SCS-menetelmästä (luku 5.6.4) tehty yksikkövaluntakäyräsovellus, jossa muodostetaan kolmion muotoinen yksikkövalunta. Yksikkövaluntakäyrä on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. NRCS (entinen SCS) syntetisointi yksikkövaluntakäyrä (Brown et al. 2009).

1 mm sadetta vastaava huippuvirtaama voidaan laskea kaavalla 11 (Brown et al. 2009).

$$q_p = \frac{\alpha \cdot K_p \cdot A_k \cdot Q_D}{t_p} \quad (11)$$

jossa g_p on huippuvirtaama [m^3/s], A_k on valuma-alueen pinta-ala [km^2], Q_D on suoran valunnan määrä [mm], t_p on huippuvirtaaman ajankohta [h], K_p on huippukerroin [-] ja α on yksikkömuunnoskerroin (SI yksiköllä 0,00043).

K_p huippukertoimelle on erilaisia arvoja valuma-alueen mäkisyydestä riippuen. Esimerkiksi 484 kuvaa yksikkövaluntakäyrää, jonka pinta-alasta 3/8 on nousevalla osalla käyrää. Huippuvirtaaman ajankohta t_p on 2/3 valunta-ajasta t_c (time of concentration). (Brown et al. 2009).

5.6.6 SWMM

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) on kehittänyt ja julkaissut SWMM-mallinnusohjelman (Storm Water Management Model). Ohjelman viimeisin versio SWMM 5 on julkaistu vuonna 2005. (Rossman 2010). SWMM-mallia on käytetty laajasti ympäri maailman (Giroás et al. 2009) ja mallista on myös kehitetty kaupallisia sovelluksia (Buttler & Davies 2004).

SWMM-ohjelma on fysiikan lakeihin perustuva diskreetti simulaatiomalli, joka perustuu massan, energian ja liikemäärän säilyvyyteen. Malli jakautuu neljään osaan (Rossman 2010): (i) ilmasto-osuus kuvaa mallinnettavan sadetapahtuman, haihdunnan ja ilman epäpuhtaudet; (ii) maankäyttöosuudessa valuma-alueelle satavasta vedestä muo-

dostuu valuntaa; (iii) kuljetusosuudessa määritetään pintavalunnan virtaus purkupisteesseen kautta verkostoon, ojiin yms.; (iiii) pohjavesiosuus määrittää imeynnän ja tuottaa tietoa kuljetusosuuteen.

Valuman laskentaa varten alue jaetaan ominaisuuksiltaan riittävän homogeenisiin osavaluma-alueisiin, josta jokaisella on yksi purkupiste. Osavaluma-alueelle määritetään hydrologiset parametrit (Rossman 2010):

- hydraulinen leveys (alueen leveys maanpäällisen virtausreitän suhteen)
- kaltevuus
- läpäisemättömän pinnan määrä TIA
- läpäisevän pinnan painannesäilyntä ja Manningin karkeuskerroin
- läpäisemättömän pinnan painannesäilyntä ja Manningin karkeuskerroin
- valumareitti (valuuko vesi molemmilta pinnoilta suoraan purkupisteesseen vai valuuko vesi läpäisemättömältä pinnalta läpäisevälle tai toisin päin).

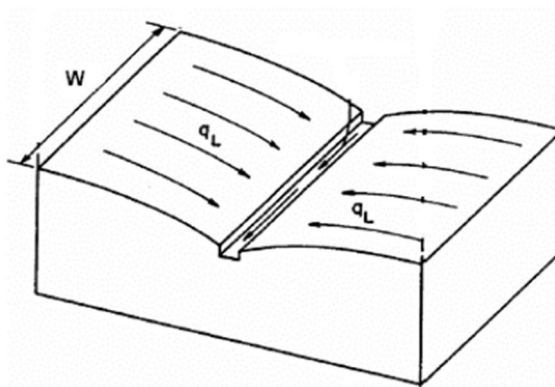
Esimerkkejä läpäisemättömän pinnan osuuksista erilaisille maankäyttömuodoille on esitetty taulukossa 23.

Taulukko 23. *Läpäisemättömän pinnan osuus maankäyttömuodon perusteella (Zaman & Ball 1994 Cho & Ball 2002 mukaan).*

Maaperä/maan käyttö	Läpäisemättömän pinnan osuus
Väljä asuinalue	37
Tiivis asuinalue	45
Hyvin tiivis asuinalue	55
Liikealue	55
Avoimet alueet	0
Teollisuusalue	55
Erityiskäyttö	50
Liikennealue	80

Rossmannin (2010) ja Gironás et al. (2009) mukaan hydraulinen leveys voidaan laskea jakamalla osavaluma-alueen pinta-ala pisimmän maanpäällisen virtausreitän pituudella. Jos virtausreitit on useita, käytetään näiden keskiarvoa. Hydraulisen leveyden periaate on esitetty kuvassa 40. (Gironás et al. 2009).

Uomavirtaus ei kuulu virtausmatkan pituuteen, joka tyypillisesti pienentää virtausreitän pituuden alle 200 metriin. Kaupunkimaisilla alueilla virtausmatkan pituus voi jäädä huomattavasti lyhyemmäksi. (Gironás et al. 2009).



Kuva 40. Hydraulisen leveyden (w) määrittäminen SWMM-menetelmässä (Gironás et al. 2009).

Painannesäilyntä tarkoittaa sateen aikana maanpinnalle lammikoituvaa vesimäärää. Kun kaikki maanpinnan painanteet ovat täyttyneet, hulevesi alkaa valumaan pinnankaltevuksien mukaisesti. Painannesäilyntän määriä on koottu taulukkoon 24. (Karamouz et al. 2010).

Taulukko 24. Painannesäilyntän määrä (Karamouz et al. 2010).

Maaperä/maan käyttö	Painannesäilyntän määrä (mm)
Hiekka	5,1
Hiesu	3,8
Savi	2,5
Läpäisemätön päällyste	1,6
Läpäisevä maa kaupunkialueella	6,25

Läpäiseviltä pinnoilta sadevettä imeytyy maahan. Imeyntä voidaan määrittää kolmella menetelmällä (i) Hortonin (ii) Greenin ja Amptin tai (iii) SCS:n käyränumeromenetelmällä. (Rossman 2010).

Osavaluma-alueelta muodostuva valunta ja valunta-aika lasketaan alueen hydraulisen leveyden, kaltevuuden, läpäisemättömän pinnan määrän, Manningin karkeuskertoimen ja valumareitin mukaan. (Rossman 2010).

5.6.7 HEC-1

U.S. Hydrology Engineering Center (HEC) of Army Corps of Engineers on kehittänyt HEC-1 sadanta valunta mallinnusohjelman vuonna 1968. Ohjelmaa on päivitetty muutamiaan otteeseen tämän jälkeen. Ohjelma on suunniteltu simuloimaan joen virtaaman muutoksia erialisissa sadetilanteissa. Ohjelmalla voidaan mallintaa lumen sadannan ja sulannan vaikutuksia, padon turvallisuutta ja tulvan aiheuttamia haittoja. Mallinnustuloksena saadaan virtaamakäyriä halutuista kohdista joesta. (Mays 2001).

Laskentaa varten luodaan hyetografi halutusta sadetilanteesta. Tehokas sadanta saadaan määritettyä häviömenetelmien kautta. Häviömenetelmiä ovat (1) alku- ja häviökerroin,

(2) eksponentiaalinen häviökerroin häviökertoimet (3) SCS-käyränumeromenetelmä (4) Holtanin häviömenetelmä (5) Green ja Ampt -imeyntämenetelmä ja (6) yhdistetty sulanta ja sadehäviö. (Mays 2001).

Yksikkövaluntakäyrät voidaan laatia käyttäjän määrittelemänä tai Clarkin, Snyderin tai SCS yksiköttömällä menetelmällä. Hydraulisessa laskennassa voidaan käyttää kinemaattista aaltoyhtälöä tai Muskingum-Cunge-menetelmää. (Mays 2001).

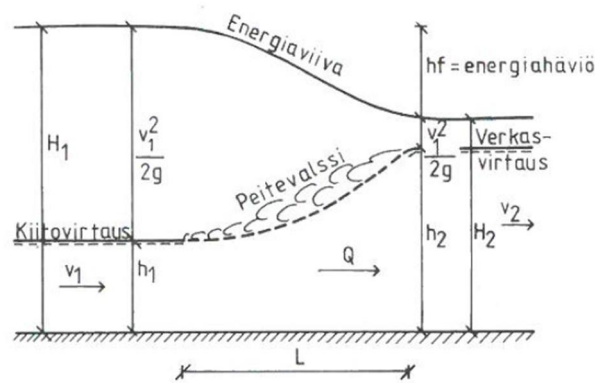
5.7 Painovoiman vaikutus virtausoloihin

Pintavalunta, virtaus avouomassa ja vajaassa putkessa perustuvat painovoimaan. Liikkeen hitausvoimien ja painovoiman perusteella virtaustila voi olla kiitovirtausta (supercritical), verkkavirtausta (subcritical) tai kriittistä (critical). Kriittisessä virtauksessa veden virtausnopeus on yhtä suuri kuin aallon etenemisnopeus ko vedensyvyydellä. Verkkavirtauksessa aalto etenee ylävirtaan ja kiitovirtauksessa alavirtaan päin. (Hooli & Pohjamo 1990). Virtaustila voidaan tarkastella Frouden luvun Fr [-] perusteella kaavalla (12).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (12)$$

jossa v on kesimääräinen virtausnopeus [m/s], g on painovoiman kiihtyvyys [m/s^2] ja L on virtauspoikkileikkaukselle ominainen pituus [m]. Avouomassa L on hydraulinen syvyys [m], joka saadaan jakamalla uoman poikkileikkausalan vesipinnan leveydellä. Jos Frouden luku on 1, niin virtaus on kriittistä. Tätä pienempi Frouden luku kuvaa verkkavirtausta ja suurempi kiitovirtausta. Koska pinta-aallon likimääräinen etenemisnopeus on \sqrt{gh} , kiitovirtauksessa aalto etenee vastavirtaan ja verkkavirtauksessa myötävirtaan. (Hooli & Pohjamo 1990).

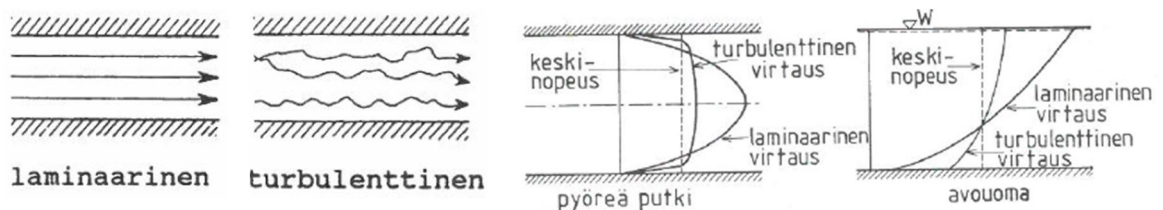
Kun virtaustila muuttuu kiitovirtauksesta verkkavirtaukseksi lyhyellä matkalla, muodostuu vesikynnys (hydraulic jump). Vesikynnyksen kohdalla vesikerroksen paksuus kasvaa ja virtausnopeus hidastuu merkittävästi, samalla osa liike-energiasta vapautuu ja osa häviää lämmöksi. Vesikynnys voi muodostua uomissa, joissa Frouden luku on lähellä yhtä, ja lyhyellä matkalla joko uoman pohjan kaltevuus loivenee ja/tai levenee. Vesikynnyksen muodostuminen on esitetty kuvassa 41. (Hooli & Pohjamo 1990).



Kuva 41. Vesikynnys (Hooli & Pohjamo 1990).

5.8 Viskositeetin vaikutus virtausoloihin

Viskositeetin vaikutuksesta virtaus voi olla laminaarista, turbulentista tai näiden siirtymäalueella. Laminaarisessa virtauksessa nesteosat liikkuvat yhdensuuntaisia ratoja pitkin, turbulenssivirtauksessa virtaus on pyörteistä ja nesteosasten liikenopeus on suurempi kuin nesteen keskimääräinen nopeus (kuva 42). (Hooli & Pohjamo 1990).



Kuva 42. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus sekä virtausten nopeuskuviot putki- ja avouomavirtauksessa (Hooli & Pohjamo 1990).

Laminaarisessa putkivirtauksessa virtausnopeus on suurin putken keskellä ja avouomavirtauksessa pinnalla. Turbulenttisessa virtauksessa virtausnopeus poikkileikkauksessa pysyy tasaisempaan. Reunan viereisessä rajakerroksessa virtausnopeus kasvaa ensin nopeasti, mutta kasvu hidastuu rajakerroksen jälkeen (kuva 42). Turbulenssi- ja laminaarivirtauksen esiintymistä voidaan määrittää Reynoldsin luvulla (kaava 13). (Hooli & Pohjamo 1990).

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (13)$$

jossa v on keskimääräinen virtausnopeus [m/s], ν on kinemaattinen viskositeetti [m²/s], L on virtauksen poikkileikkaus (putkelle halkaisija, avouomassa hydraulinen säde) [m]. Putkivirtauksessa virtaus on laminaarista jos Re on alle 2320 ja turbulentista jos Re on yli 3000. Arvojen 2320-3000 välistä aluetta kutsutaan siirtymäalueeksi, jossa virtaustila voi muuttua helposti. Uomavirtauksessa vastaava siirtymäalue on likimain 500-2000 välisellä alueella. Uomissa ja putkessa virtaus on yleensä turbulentista. Pohjavesivirtaus on enimmäkseen laminaarista. (Hooli & Pohjamo 1990).

5.9 Hydraulinen laskenta

Virtauslaskennan helpottamiseksi olosuhteita usein yksinkertaistetaan (Brown et al. 2009). Stationäärisessä eli pysyvässä virtauksessa (steady flow) virtaama oletetaan vakioksi eli vesikerroksen paksuus, virtausnopeus, paine ja muut virtaustekijät eivät muutu ajan suhteen. Tasaisessa virtauksessa (uniform flow) uoman jokaisen poikkileikkauksen virtaustekijät ovat samat. Mikäli uoman poikkileikkaus muuttuu, on kyseessä muuttuva virtaus (varied flow). Muuttuva virtaus voi olla nopeasti muuttuvaa (rapidly varied flow), jolloin virtauksen muutos johtuu paikallisesta ilmiöstä kuten vesikynnyksestä. Asteittain muuttuvassa virtauksessa (gradually varied flow) virtausnopeus ja vesikerroksen paksuus muuttuvat hitaasti. Vesikynnyksiä ei muodostu, mutta vedennopeuden kiihtyessä tai hidastuessa veden pinnan kaltevuus muuttuu eli vedenpinnan kaltevuus on pohjan kaltevuutta jyrkempi tai loivempi. (Hooli & Pohjamo 1990). Valittu virtaamalakentamenetelmä vaikuttaa mallinnuksessa käytettävään aika-askeleen pituuteen ja laskennan raskauteen (Rossman 2010).

Muuttuvassa avouomavirtauksessa virtaaman poikkileikkaus vaihtelee matkan suhteen ja virtaama muuttuu ajan suhteen. Eli muuttuvaa avouomavirtausta mallinnettaessa virtaama ja vedenkorkeus uoman eri pisteissä muuttuvat ajan funktiona. Laskenta perustuu yleensä Saint Venantin yhtälöön tai sen sovelluksiin. (Zoppou 2001) Saint Venantin yhtälön ratkaisumenetelmiä on esitetty luvussa 5.9.1. Muita virtaamalakentamenetelmiä on esitetty luvuissa 5.9.2-5.9.4.

5.9.1 Saint Venantin yhtälö eli dynaaminen aaltoyhtälö

Saint Venantin yhtälö (tunnetaan myös nimellä shallow water wave equations), koostuu jatkuvuusyhtälöstä (14) ja liikemääräyhtälöstä (15). (Zoppou 2001, Lyngfelt 1985). Yhtälöparin on kehittänyt Barre de Saint Venant vuonna 1871 (Mustonen 1986). Yhtälöt esitetään yleensä ei-konservatiivisessa muodossa, jossa virtausnopeus $u = Q/A$ ja y on riippuva muuttuja uoman yksikköleveydelle (Zoppou 2001).

$$\text{Jatkuvuusyhtälö on } \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial(uy)}{\partial x} = q \quad (14)$$

$$\text{Liikemääräyhtälö on } \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - gA = S_0 - S_f - \frac{qu}{gy} \quad (15)$$

Yhtälöissä q on virtaama [m^3/s] kohtisuoraan kanavan poikkileikkausta vastaan, x on etäisyys [m], A on virtauksen poikkileikkauspinta-ala [m^2], t on aika [s], g on painovoiman kiihtyvyys [m/s^2], S_0 on pohjan kaltevuus [-] ja S_f on kitkakaltevuus [-]. Kitkakaltevuus voidaan arvioida Manningin tai Chezyn yhtälön perusteella. Kitkakaltevuus Manningin yhtälössä on esitetty kaavassa (16), jossa η on Manningin kitkakerroin, R on hydraulinen säde ja K on häviökerroin. (Zoppou 2001).

$$S_f = K^2 |Q|Q = \frac{u|u|\eta^2}{R^{4/3}} \quad (16)$$

Jatkuvuusyhtälö perustuu massan säilymisen lakiin (Zoppou 2001). Massan säilymisen lain mukaan tietyllä aikavälillä tarkastelukohtaan tulevan ja lähtevän virtaaman erotuksen on oltava yhtä suuri tarkastelukohtaan varastoituneen vesimäärän kanssa. Liikemäärän säilymisen periaatteen mukaan tarkastelukohtaan tulevan ja lähtevän liikemäärän erotuksen ja kohtaan vaikuttavien ulkoisten voimien summa on yhtä suuri kuin liikemäärän muutos tarkastelukohdassa. Virtausnopeus määräytyy liikemääräyhtälön perusteella. (Zoppou 2001, Mustonen 1986).

Saint Venantin yhtälöt ovat hyperboolisia (Zoppou 2001). Yhtälöiden ratkaiseminen edellyttää, että alku- ja reunaehdot tunnetaan. (Mustonen 1986). Saint-Venantin yhtälön numeerista ratkaisua kutsutaan dynaamiseksi aaltoyhtälöksi. Yhtälö ratkaisee Saint Venantin -virtausyhtälöt täydellisesti. Dynaaminen aaltoyhtälö mahdollistaa virtausajan huomioimisen, veden varastoitumisen verkostoon, verkoston paineistumisen, virtauksen suunnan vaihtumisen, seisovan veden, paikallishäviöiden ja alapuolisen padotuksen huomioimisen. (Rossman 2010).

Virtaaman ollessa tasaista, jatkuvuusyhtälö yksinkertaistuu muotoon $d(uy)/dx = q$, ja virtaaman liikemääräyhtälö (15) supistuu muotoon (17).

$$S_f - S_0 - \frac{qu}{y} = \frac{d(y+u^2/2g)}{dx} \quad (17)$$

Tasaisessa virtauksessa vedenpinnankorkeus avouomassa lasketaan ylävirtaan iteratiivisesti. Tämän tyyppistä analyysiä kutsutaan padotuslaskennaksi (backwater analysis). (Zoppou 2001).

Rossmannin mukaan (2010) dynaamista aaltoyhtälöä käytettäessä aika-askeleen on oltava pieni, jotta laskenta pysyy tarkkana. Suositeltava aika on sekunneista minuuttiin. Liian suuri aika-askel johtaa laskennan epästabiiliuteen.

Dynaamista aaltoyhtälöä hyödyntävissä mallissa voi esiintyä numeerista epävakautta. Tuloksissa tämä on havaittavissa virtaaman tai vesipatsaan paksuuden huomattavana heiluntana. Mallin numeerista epästabiiliutta voidaan vähentää käyttämällä kinemaattista aaltoyhtälöä (Rossman 2010).

5.9.2 Kinemaattinen aaltoyhtälö

Kinemaattinen aaltoyhtälö on laajasti käytetty yksinkertaistus dynaamisesta aaltoyhtälöstä. Kinemaattisessa aaltoyhtälössä paikka, kiihtyvyys ja painetermit voidaan jättää huomioimatta. Tämä tarkoittaa, että kitkalkaltevuus ja vedenpinnankaltevuus muodostuvat samansuuruisiksi eli $S_f = S_0$. Tämä oletus on voimassa pintavalunnassa ja jyrkissä kanavavirtauksissa. Kinemaattinen aaltoyhtälö supistuu yhdeksi yhtälöksi (18).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + V \frac{\partial Q}{\partial x} = qV \quad (18)$$

jossa V on kinemaattisen aallon nopeus tai Kleitz-Seddonin laki. (Zoppou 2001).

Kinemaattinen yhtälö sallii virtaaman vaihtelut ajan ja paikan mukaan, jolloin verkoston sisällä voi tapahtua viivästymistä ja varastoitumista. Virtaus ei kuitenkaan voi muuttua paineelliseksi, alapuolista padotusta, paikallishäviöitä kuten nielu- ja purkautumishäviöitä ei voida määrittää. (Rossman 2010).

Rossmanin mukaan (2010) kinemaattisen aaltoyhtälön etu on numeerinen stabiilius useamman minuutin mittaisilla laskennan aika-akselilla, jonka vuoksi yhtälö soveltuu pitkien ajanjaksojen laskentaan.

5.9.3 Stationäärinen eli pysyvä virtaus (steady flow)

Stationäärisessä virtauksessa vesisyvyys, virtausnopeus, paine ym. virtaustekijät eivät muutu ajan funktiona. Stationäärisessä virtauksessa virtaus on jatkuvaa, eli virtaama on vakio. Käytettävät virtaamakaavat (vajaa putkivirtaus/avouomavirtaus ja täyden putken virtaus) ovat samat kuin laskettaessa käsin. (Pohjamo & Hooli 1990).

Stationäärisessä virtauksessa virtausaikaa, muutoksia vesisyvyydessä eli varastoitumista verkostoon, alapuolista padotusta, poikkipinta-alan muutoksista aiheutuvia häviöitä tai paikallishäviöitä kuten nielu- ja purkautumishäviöitä ei huomioida. Verkoston risteyskohdista voi olla vain yksi poistumissuunta eikä virtaama voi olla paineellista. Tasaista virtausta voidaan hyödyntää alustavaan tarkasteluun. (Rossman 2010).

5.9.4 Convex-menetelmä

Convex-menetelmä perustuu tulo- ja purkupisteiden virtaamakäyrien väliseen suhteeseen. Menetelmässä virtaus määritetään virtausnopeuden ja virtausmatkan perusteella. Menetelmä käyttää ainoastaan edellisen aika-askeleen virtaamatietoja. (Mockus & Styner 1972). Virtaama lasketaan kaavalla 19.

$$O_2 = cI_1 + (1 - c)O_1 \quad (19)$$

jossa O_2 on purkuvirtaama [m^3/s] hetkellä t_2 , c on aika-askeleen ja virtausajan suhteeseen perustuva kerroin [-], I_1 on tulovirtaama [m^3/s] hetkellä t_1 ja O_1 on purkuvirtaama [m^3/s] hetkellä t_1 . Aika-askeleen tulee olla virtausaikaa pienempi ($0 < c < 1$). Virtausaika ei ole vakio vaan nopeuden funktio. Kerroin c [-] voidaan määrittää aika-askeleen pituuden Δt [s] ja virtausajan K [s] perusteella $c = \Delta t/K$. (Mockus & Styner 1972).

Convex-menetelmää on käytetty TR-20 mallinnusohjelmassa uomavirtaaman määrittämiseen. Menetelmä on herkkä käytettyyn aikavälin suhteen, eikä aikavälin pituudelle

ole olemassa hyvää teknistä perustetta. Nykyisin TR-20 mallinnusohjelma käyttää Muskingum-Cunge -menetelmää. (USDA 2014).

5.10 Valunta-aika

Valunta-aika t_c (time of concentration) kuvaa osavaluma-alueen reunalta purkupisteeseen kuluvaa virtausaikaa. Pienillä valuma-alueilla valunta-aikaan ei vaikuta merkittävästi kaltevuus tai virtaustapa. Mays:n (2001) mukaan alle 0,4 ha valuma-alueille ei kannata laskea tarkkaa valunta-aikaa vaan käyttää taulukoituja valunta-aikoja (taulukko 25).

Taulukko 25. Minimivalunta-aikoja pienille valuma-alueille (MSMA 2000).

Sijainti	Valunta-aika
Katto- ja kiinteistöviemäröinti	5 min
Katujen kaivorakenteet	5 min
Alle 0,4 ha valuma-alueet	10 min

Suuremmilla valuma-alueilla valuma-alueen ja sateen ominaisuudet sekä valunta-ajan vaikutus purkautuvaan virtaamaan kasvavat. Valunta-ajan määrittämiseksi on kehitetty useita menetelmiä. Valittu valuntamenetelmä voi vaikuttaa valunta-ajan pituuteen tai määrittystapaan. Esimerkiksi rationaalisessa menetelmässä valunta-ajan tulee olla vähintään samansuuruinen kuin sateen keston. EPA:n SWMM-menetelmässä valunta-aikamenetelmää ei voi valita. Useisiin laskentamenetelmiin valunta-ajan voi antaa myös itse. Yksinkertaisimmillaan aika voidaan laskea virtausnopeuden v ja matkan L suhteessa $t = L/v$.

Paljon käytettyjä menetelmiä valunta-ajan määrittämiseen ovat kinemaattinen aaltoyhtälö ja TR-55 -menetelmän mukainen osista koostuva valunta-aika.

Kinemattisen aaltoyhtälöön perustuvalla menetelmällä valunta-aika lasketaan kaavalla (20).

$$t_c = \left(\frac{L}{\gamma i_e^{k-1}} \right)^{1/k} \quad (20)$$

jossa L on virtausmatkan pituus [m], i_e on tehokas sadanta [m/s] ja γ on kinemaattisen aaltoyhtälön parametri. γ :n arvoon vaikuttaa virtausolosuhteet. Turbulenttisessa virtauksessa $\gamma = \sqrt{S}/n$ ja laminaarisessa $\gamma = gS/3v$. Yhtälöissä S on kaltevuus [m/m], n on Manningin karkeuskerroin ja v on kinemaattinen viskositeetti [m²/s]. Kinemaattinen aaltoyhtälö huomioi sateen vaikutuksen virtausnopeuteen: jos sateen intensiteetin kasvaa, valunta-aika lyhenee. (Karamouz et al. 2010).

TR-55 -menetelmässä valuma-aika koostuu osista: pintavirtausta (sheet flow), matalasta virtauksesta (shallow concentrated flow), kanavavirtauksesta (channel flow) ja putkivir-

tauksesta. Valunta-aika saadaan laskemalla yhteen pisimmän reitin virtausajat. (Brown et al. 2009, USDA 2010).

Pintavalunta tapahtuu alussa hyvin ohuena kerroksena. Tämän tyylistä virtausta esiintyy valuma-alueen ylimmillä kohdilla pisimmillään 130 metriä, mutta jää yleensä alle 25 metriin. Ohuena kerroksena tapahtuva pintavalunta lasketaan kinemaattisen aaltoon perustuvalla yhtälöllä (21). (Brown et al. 2009, USDA 2010).

$$t_{sf} = \frac{6,92}{I^{0,4}} \cdot \left(\frac{nL}{\sqrt{S}} \right)^{0,6} \quad (21)$$

jossa t_{sf} on valunta-aika [min], n on Manningin karkeuskerroin, L on virtausmatka [m], I on sateen intensiteetti [mm/h] ja S on pinnan kaltevuus [m/m]. Valuva vesi pyrkii muodostamaan pieniä puroja, joissa virtausaika lasketaan yhtälöllä (22). (Brown et al. 2009, USDA 2010).

$$t_{scf} = \frac{L}{k \cdot S_p^{0,5}} \quad (22)$$

jossa t_{scf} on valunta-aika [s], k on maankäytöstä johtuva kerroin ja S_p on kaltevuus [%]. Virtausaika ojissa, kanavissa ja vajaassa putkessa lasketaan Manningin kaavalla (23). (Brown et al. 2009).

$$t_{ocf} = \frac{L}{n \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}} \quad (23)$$

jossa t_{ocf} on valunta-aika [s], L on virtausmatka [m] ja S on keskimääräinen kaltevuus [m/m]. Esimerkkejä muista, paljon käytetyistä laskentamenetelmistä on koottu taulukoon 26. Taulukossa pituus lasketaan jalkoina ja maileina.

Taulukko 26. Valunta-ajan (T_c) laskentamenetelmät. Yhtälöissä L_f on pituus jalkoina, L_{mi} on pituus maileina, S_p on kaltevuus prosentteina ja S on kaltevuus [ft/ft].

Menetelmä	T_c [h]	Merkkien selitykset
Carter ²	$1,7 \cdot L_{mi}^{0,6} \cdot S^{<0,3}$	S on kaltevuus [ft/mi]
Eagelson ²	$0,0001852 L_f \cdot n \cdot R_f^{<2/3} \cdot S^{<0,5}$	
Espey/Winslow ²	$0,52 \Phi L_f^{0,29} \cdot S^{<0,145} \cdot I_p^{<0,6}$	Φ on Espeyn kanavointikerroin, I_p on päällystämättömän pinnan osuus [%]
FAA ²	$1,8(1,1 - C) L_f^{0,55} / S_p^{0,333}$	C on rationaalisen menetelmän valumakerroin
Kerby/Hathway ¹	$(2,2 L_f N / S^{0,5})^{0,324}$	N on virtaaman hidastumiskerroin
Kirpich ¹	$0,0007 L_f^{0,77} \cdot S^{-0,385}$	
SCS Lag ¹	$\frac{L_f^{0,8} \cdot (S + 1)^{0,7}}{1,900 S_p^{0,5}}$	$S=1000/CN-10$, jossa CN on viipymäkerroin
Papadis and Kazan ¹	$0,66 L_f^{0,5} n^{0,52} S^{-0,31} i^{-0,38}$	i on tehokkaan sateen intensiteetti [in/h]

¹ USDA 2010 ²Manual B

Taulukossa esitetyissä menetelmissä valunta-aika lasketaan kaltevuuden ja pituuden perusteella. Ainoastaan Papadis ja Kazan -menetelmä huomioi sateen intensiteetin vaikutusta virtausnopeuteen. Kaikilla menetelmillä on omat rajoituksensa. Esimerkiksi Kirpich-menetelmä on kehitetty pienille valuma-alueille. Alueella valunta on pääasiassa maanpäällistä ja menetelmää sovellettaessa virtausmatkan tulee olla alle 300 m. (USDA 2010).

5.11 Paikallishäviöt hydraulisessa laskennassa

Paikallishäviöitä muodostuu virtausolosuhteiden muuttuessa, esimerkiksi putken koon muuttuessa, mutkissa, venttiilien kohdalla, kaivoissa tms. Paikallishäviöiden suuruuteen vaikuttavat muutoksen suuruus ja putken/uoman koko. Paikallisvastukset lasketaan yleensä kokeellisesti määritettyjen arvojen, taulukoiden tai kaavojen avulla. (Karttunen & Tuhkanen 2003).

Huleveden virratessa kaivoon, altaaseen tai järveen tai pois ko. rakenteesta, muodostuu nielu- ja purkautumishäviötä. Yksinkertaisimmillaan häviö voidaan antaa virtaamasta riippumattomana vakiona. Yleensä häviö lasketaan virtaamaan suhteutettuna. Uoman koko ei vaikuta muodostuviin nielu- ja purkautumishäviökertoimiin. (Karttunen & Tuhkanen 2003). Erilaisia menetelmiä on esitetty luvuissa 5.11.1-5.11.3. Häviöt lasketaan yleensä kertoimien ja nopeuskorkeuden $v^2/2g$ perusteella.

5.11.1 Yleinen ja geneerinen häviökaava

Yleinen häviökaava (24) ja geneerinen häviökaava (25) perustuvat käyttäjän antamaan vastuskertoimeen K [-] ja nopeuskorkeuteen. Tulos h_p saadaan metreinä. Yleinen häviökaava perustuu yhteen kertoimeen. Geneerisessä menetelmässä häviö lasketaan nielu- ja purkautumiskertoimen erotuksena.

$$h_p = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (24)$$

$$h_p = K_0 \cdot \frac{v_0^2}{2g} - K_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (25)$$

Yleisessä häviökaavassa (24) K on vastuskerroin [-], v on virtausnopeus putkessa [m/s] ja g on painovoiman kiihtyvyys [m/s^2]. (Hooli & Pohjamo 1990, Karttunen & Tuhkanen 2003, UDFCD 2009).

Geneerisessä häviökaavassa (25) K_0 on purkautumiskerroin [-], v_0 on purkuputken virtausnopeus [m/s], K_1 on nielukerroin [-], v_1 on tuloputken virtausnopeus [m/s] ja g on painovoiman kiihtyvyys [m/s^2]. (UDFCD 2009).

5.11.2 HEC-22

HEC-22 (Hydraulic Engineerin Circular No 22) on USA:n liittovaltion tiehallinnon FHWA:n (Federal Highway Administration) julkaisema suunnitteluohjeistus. Paikallishäviöiden laskenta perustuu yleiseen kaavaan (24). Häviökerrointa varten on määritetty laboratorio-olosuhteissa viisi korjauskerrointa (kaava 26). Menetelmää ei voi hyödyntää tilanteissa, joissa tuloputken vesijuoksun korkeus on vedenpinnantason alapuolella tai virtaama määräytyy tulojärjestelyiden perusteella. (UDFCD 2009).

$$K = K_0 \cdot C_D \cdot C_d \cdot C_Q \cdot C_p \cdot C_B \quad (26)$$

jossa K on korjattu vastuskerroin ja K_0 on kaivon kokkoon suhteutettu vastuskerroin. Korjauskertoimia viisi: putken halkaisija C_D , vesipatsaan paksuus C_d , suhteellinen virtaama C_Q , upotusvirtaama C_p ja tuloaukon sijainti C_B . Kaikki kertoimet ovat yksiköttömiä. (UDFCD 2009).

5.11.3 AASHTO

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation officials) julkaisemassa suunnitteluohjeistuksen nielu- ja purkuhäviöiden laskenta perustuu kaavaan 27.

$$h_s = (h_c + h_b + h_e) \cdot C_n \cdot C_s \quad (27)$$

Menetelmässä rakenteen painehäviö h_s [m] koostuu kolmesta yhteenlaskettavasta häviöstä (i) supistumishäviöstä h_c , [m] (ii) kaarevuushäviöstä h_b [m] ja (iii) laajentumishäviöstä h_e [m]. Häviöiden summa kerrotaan avouomavirtauksen korjauskertoimilla C_n [-] ja muokkauskertoimella C_s [-]. (UDFCD 2009).

5.12 Lähtötietojen tarkkuus

Yleensä mallinnus joudutaan tekemään epätäydellisten lähtötietojen perusteella. Alueellisesta sadannasta ei ole riittävästi tietoa, maaperän imeytyminen, painannesäilynnän määrää tai valuntakerroin valitaan kirjallisuusarvoihin perustuen.

Mallinnusta varten tietoja joudutaan yksinkertaistamaan ja yleistämään laskennan helpottamiseksi. Tämä tulee muistaa tulosten analysoinnissa.

6. MENETELMÄT

6.1 Mallinnusohjelmat

Vertailuun valittiin kaksi mallinnusohjelmaa: ohjelma A ja B. Molemmat ohjelmat ovat kaupallisia ja sovellukset ovat maailmanlaajuisessa käytössä. Molemmat ohjelmat perustuvat linkkeihin ja solmupisteisiin pohjautuvaan mallintamiseen, jota voidaan hyödyntää hydrologian, hydraulikan ja vedenlaadun mallintamiseen. Linkki on mallissa hydraulinen elementti, kuten oja, kanava tai putki, joka kuljettaa virtaamaa eteenpäin. Solmupiste on kohta, joka yhdistää linkit toisiinsa. Solmupisteen kohdalla voi sijaita kaivo, pumppu tai varastointielementti kuten lampi. Solmupiste voi kuvata myös linkin linjauksen muutoskohtaa.

Käyttöohjeiden perusteella ohjelma A on suunniteltu hulevesien ja viemäri-vesien mallintamiseen. Ohjelma B on suunniteltu suurimmaksi osaksi paineellisesta viemäreistä koostuvan verkoston mallintamiseen. Ohjelmassa on kuitenkin hulevesien mallinnukseen soveltuvia työkaluja ja mahdollisuuksia hankkia lisäosia (laskentamenetelmiä) parantamaan hulevesimallinnuksen laskentaominaisuuksia. Vertailun tavoitteena on selvittää ohjelmien käyttömahdollisuudet ja rajoitukset sekä verrata mallinnusohjelmien käyttöominaisuuksia. Vertailun perusteella myös tarkastellaan edellyttääkö ohjelman B hyödyntäminen lisäosien hankintaa.

Molemmat ohjelmat toimivat itsenäisessä ns. stand alone -käyttöliittymässä. Lisäksi ohjelmaa B voidaan käyttää sekä Microstation- että AutoCAD- ympäristössä. Ohjelmien vertailu tehdään stand alone -ohjelmaversioilla.

Vertailu tehdään mallintamalla molemmilla ohjelmilla kaksi esimerkkitapausta samoilla mallinnusparametreilla. Tulosten erojen lisäksi verrataan ohjelmien helppokäyttöisyyttä ja tulosten esitettävyyttä.

6.2 Ohjelmien perusominaisuudet

Molempien ohjelmien perusominaisuudet, kuten käytettävissä olevat tärkeimmät laskentamenetelmät on koottu taulukkoon 27. Molemmilla ohjelmilla pystytään mallintamaan pysyvää virtausta (steady state) tai simuloimaan yhtä tai useampaa sadetapahtumaa.

Taulukko 27. Mallinnusohjelmien perusominaisuuksia. Taulukossa UH (unit hydrograph) tarkoittaa virtaaman aikakäyrää.

Laskenta- ominaisuudet	Ohjelma A	Ohjelma B
Yksiköt	SI, US	SI, US
SI virtaamayksiköt	l/s, m ³ /s, m ³ /d	l/s, l/min, l/h, l/d, m ³ /s, m ³ /min, m ³ /h, m ³ /d
Käyttötarkoitus	Verkoston analysointi Putken koon optimointi	Verkoston analysointi Verkoston suunnittelu
Hydraulinen laskenta	Stationäärinen virtaus Kinemaattinen aaltoyhtälö Dynaaminen aaltoyhtälö	Stationäärinen virtaus EPS: kapasiteetti/backwater (menetelmänä Convex)
Valunta	SWMM Rational Modified Rational DeKalb Rational Santa Barbara UH SCS TR-20 ja TR-55 HEC-1 UK Modified Rational	SWMM ILSAX Modified Rational Aika-pinta-ala Yksikkövaluntakäyrämentelmät: Generic, RTK, SCS, käyttäjän määrittämä
Valunta-aika (t _c)	Carter Eagelson FAA (Federal Aviation Agency) Harris County (TX) Kirpich Papadakis-Kazaan (Az) SCS TR-55 Käyttäjän määrittelemä	Carter Eagelson Espey-Winslow FAA (Federal Aviation Agency) Kerby-Hathaway Kirpich (PA) ja (TN) Pituus ja virtausnopeus SCS Lag ja TR-55 Friendsin yhtälö Kinemaattinen aalto Bransby-Williamsin yhtälö UK standardi Käyttäjän määrittelemä
Vajaan putken virtaus, avouomavirtaus	Manning	Darcy-Weisbach Hazen-Williams Kutters Manning
Painelinja	Darcy-Weisbach Hazen-Williams	Darcy-Weisbach Hazen-Williams Manning
Rummut	FHEA: Hydraulic Design of Highway Culverts	
Paikallishäviöt	Putkeen syötetty nielu- ja purkuhäviökerroin	absoluuttinen (vakio arvo) yleinen geneerinen virtaama-häviö käyrä ASHTOO HEC-22

Verkostoon johdettava virtaama voidaan tuottaa valuma-alueelle annettujen ominaisuuksien ja valitun sateen perusteella. Tulovirtaama voidaan syöttää verkostoon myös suoraan esimerkiksi tarkastuskaivojen kautta. Virtaamatieto voidaan antaa vakiovirtaamana tai ajan suhteen muuttuvana virtaamana kuten virtaaman aikakuvaajana (hydrograph load) tai keskimääräisen virtaaman suhteen esitettynä kuvaajana (pattern load).

Molemmilla ohjelmilla on valittavana useita laskentamenetelmiä valuntahydrologian sekä valuma-ajan määrittämiseksi. Kaikki laskentamenetelmät eivät ole keskenään yhteensopivia, vaan valittu valuntamenetelmä vaikuttaa käytettävissä oleviin muihin laskentamenetelmiin.

Kaikki laskentamenetelmät mahdollistavat yhdestä sateesta muodostuvan hulevesimäärän arvioimisen. SWMM-menetelmällä on lisäksi mahdollista mm. tehdä pitkän aikavälin simulaatiota, mallintaa haitta-aineiden kulkeutumista, pohjaveden vuotamista verkostoon ja lumensulantaa.

Ohjelmassa A on käytettävissä tarkempaan mallinnukseen soveltuva laskentamenetelmä kuin ohjelmassa B. Ohjelmassa B on useampia laskentamenetelmiä valittavana niin valuntamenetelmän, -ajan kuin häviöidenkin suhteen. Hydrauliset laskentamenetelmät esitetään tarkemmin seuraavassa luvussa.

6.3 Hydraulinen laskenta

Ohjelman A hydraulisessa laskennassa voidaan käyttää dynaamista aaltoyhtälöä, kinemaattista aaltoyhtälöä tai stationääristä virtausta. Virtaushäviöt lasketaan valitun laskentamenetelmän mukaisesti. Kitkahäviö lasketaan Manningin yhtälöllä. Painelinjoissa käytetään Hazen-Williamsin tai Darcy-Weisbachin yhtälöä.

Ohjelma A laskee ensin hydraulisen gradientin (HGL) ja huippuvirtausnopeudet putkeen tulevalle ja lähtevälle virtaamille. Energiagradientti (EGL) lasketaan lisäämällä nopeuskorkeus hydrauliseen gradienttiin.

Paikallishäviöt, kuten nielu- ja purkautumishäviöt lasketaan erikseen, koska energiayhtälö ei ole voimassa kaivossa. Paikallishäviöt lasketaan yhtälöllä (28) käyttäjän syöttämien nielu- ja paikallishäviökertoimien avulla.

$$H_e = \left(\frac{K}{2gL} \right) \cdot V_e \cdot \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (28)$$

jossa K on häviökerroin (nielu tai purkuhäviö) [-], L kaivon halkaisija [m], V_e on virtausnopeus tulo- tai lähtölinjassa [m/s], Q on virtaama [m³/s] ja A on virtaaman pinta-ala [m²]. Kaivon kokonaishäviö on nielu- ja purkuhäviöiden summa.

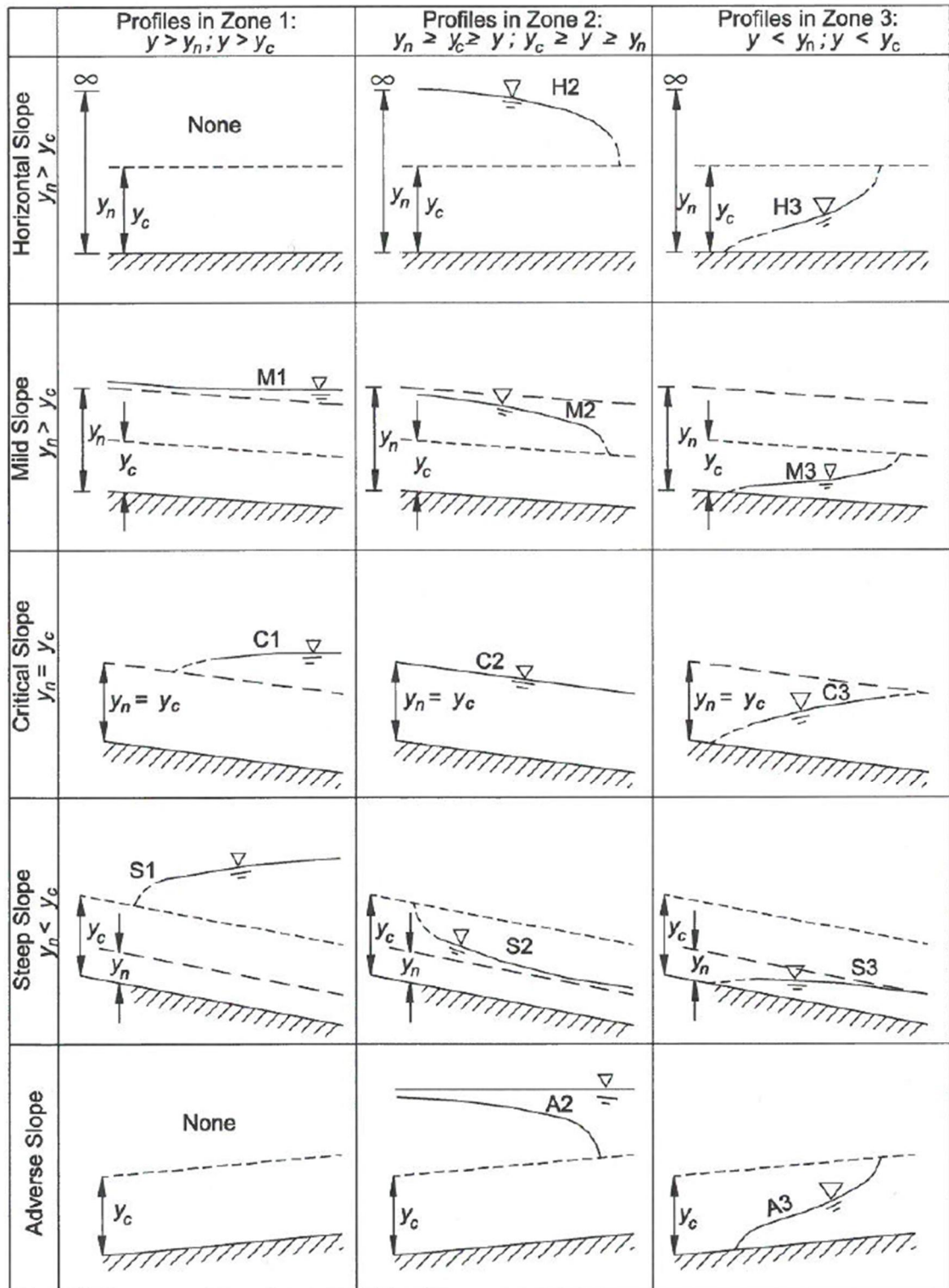
Ohjelma A laskee rumpujen virtaaman Federal Highway Administration (FHWA) julkaisun Hydraulic Design of Highway Culverts mukaisesti.

Ohjelma B käyttää hydraulista gradienttia asteittain muuttuvan virtaaman laskennan perusteena. Energiaviiva lasketaan hydraulisesta gradientista nopeuskorkeuden avulla. Laskentatavasta johtuen energiaviivassa voi olla epäjatkuvuutta. Laskennassa rakenteet analysoidaan erikseen putkesta. Mallinnettaessa vaihtelevaa virtaamaa ohjelma B jakaa uomavirtaukset viiteen kaltevuusluokkaan ja kolmeen alueluokkaan (kuva 43). Kaltevuusluokka kuvaa uoman kaltevuutta verrattuna kriittiseen kaltevuuteen. Luokka voi vaihdella virtaaman mukaan. Kaltevuusluokat ovat:

- negatiivinen kaltevuus
- tasainen kaltevuus
- loiva kaltevuus (uoman kaltevuus pienempi kuin kriittinen kaltevuus)
- kriittinen kaltevuus ja
- jyrkkä kaltevuus (uoman kaltevuus suurempi kuin kriittinen kaltevuus).

Virtaama on verkkavirtausta ensimmäisissä neljässä vaihtoehdossa. Viidennessä luokassa virtaama on kiitovirtausta, ellei vedenpinnankorkeus linjan purkupäässä muuta virtausolosuhdetta verkkavirtaukseksi. Alueluokat 1-3 määräytyvät virtaaman vesisyvyyden suhteesta vakiosyvyyteen (stationäärinen eli tasaisen virtauksen syvyys) ja rajasyvyyteen. Virtaaman syvyys on alueluokassa:

1. vakiosyvyyden ja rajasyvyyden yläpuolella
2. vakiosyvyyden ja rajasyvyyden välillä
3. molempien alapuolella.



Kuva 43. Kaltevuusluokat ja alueluokat (Ohjelma B:n manuaalin mukaan teoksesta Chow 1959). Kuvassa y_c on kriittinen syvyys, y_n on vakiosyvyys ja y on virtaaman syvyys.

Ohjelma B käyttämä energiayhtälö (29) perustuu Bernoullin energiayhtälöön. Bernoullin yhtälön asemaenergia mgh on muutettu lisätyksi energiaksi h_p (esim. pumppaus) [m] ja paikallishäviöiksi h_L [m]. Avuomavirtauksessa paine putken alku- ja loppupäässä on

nolla eikä lisättyä energiaa ole. Tasapainotus tehdään myös laskettaessa asteittain muuttuvaa virtaamaa.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_p = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (29)$$

jossa painekorkeus on p/γ , nopeuskorkeus on $v^2/2g$, h_p on lisätty energia [m] ja h_L on paikallishäviö [m].

Padotuslaskennassa (Backwater analysis) laskenta aloitetaan purkupisteestä, josta edetään ylävirtaan. Purkupisteen olosuhteeksi voidaan valita vapaa purku, vedenpinnankorkeus putken yläreunan tasolla tai käyttäjän määräämällä korkeudella. Kaivojen tulviessa paineviivan korkeus on maanpinnan korkeus tai kaivon korkeus. Ohjelma laskee jyrkät putkiosuudet virtaamasuunnassa (Frontwater analyysi), koska putken virtaama määräytyy tulo rakenteen perusteella. Frontwater analyysiä jatketaan putkiosuuden loppuun tai kohtaan jossa saavutetaan normaali syvyys tai johon on muodostunut vesikynnys.

Vesikerroksen paksuus uomassa vaikuttaa virtausnopeuteen. Putken ollessa täysi, virtausnopeus lasketaan täyden putken virtaamana. Virtausnopeus lasketaan yhtenäisenä virtaamana, kun vesikerroksen syvyys vastaa vakiosyvyyttä. Virtausnopeus voidaan laskea yksinkertaisena, keskimääräisenä virtausnopeutena, joka ei huomioi virtaaman syvyyden muutoksia. Painotettua keskimääräistä virtausnopeutta varten putken pituus jaetaan osiin pituuden suhteen ja virtausnopeus lasketaan painotettuna keskiarvona. Viipymä putkessa lasketaan virtausnopeuden ja putken pituuden perusteella.

Kapasiteettianalyysissä laskenta suoritetaan purkupisteestä virtaamaa ylöspäin, mutta laskennassa hyödynnetään täyden putken kapasiteettia ja alavirtaaman hydraulista korkeustasoa (purkupisteessä vapaa purkautuminen). Kapasiteettianalyysi antaa karkeamman arvion virtausolosuhteista Backwater analyysiin verrattuna.

Kitkahäviö H_L [m] lasketaan tarkasteluosuuksittain keskimääräisen kitkakaltevuuden S_{avg} [-] ja tarkasteluosuuden pituuden Δx [m] perusteella kaavalla (30).

$$H_L = S_{avg} \cdot \Delta x = \frac{S_1 + S_2}{2} \cdot \Delta x \quad (30)$$

jossa kitkakaltevuus tarkasteluosuuden alussa on S_1 ja lopussa S_2 . Virtaaman syvyys lasketaan iteroimalla kitkakaltevuuden perusteella. Laskennassa virtaaman syvyydelle annetaan oletusarvo, jonka perusteella ratkaistaan segmentin pituus. Laskennassa huomioidaan kohdat, joissa putki on täynnä ja virtaama kyseisessä kohdassa on paineellista.

Täyden putken profiili muodostuu, kun virtaama on samansuuruinen tai suurempi mitä putkiosuuden kapasiteetti.

Kaivoissa muodostuvat nielu- ja purkautumishäviöt voidaan määrittää kuudella eri laskentamenetelmällä (taulukko 27). Laskentamenetelmistä on lisäksi erilaisia variaatioita

riippuen kaivon pohjan muotoilusta yms., jolloin laskentatapojen määrä on 16. Käytävissä voi olla useita laskentamenetelmiä samanaikaisesti ja laskentamenetelmän voi valita kaivokohtaisesti.

Ohjelman B laskentamenetelmä mahdollistaa erimittaisten aika-askelten valinnan veden valunnan sekä vietto- ja paineviemärin mallintamiseen.

Ohjelmaan on saatavilla lisäosana tarkempia laskentamenetelmiä. Lisäosan myötä käyttöön saa SWMM-menetelmän laskenta-algoritmin ja ohjelman tuottaman oman Saint-Venantin yhtälöön perustuvan laskentamenetelmän.

6.4 Mallin rakentaminen

Mallin rakentaminen ”käsin” ohjelmalla A on esitetty luvussa 6.4.1 ja ohjelmalla B luvussa 6.4.2. Malli voidaan rakentaa myös tuomalla tietoja ohjelmaan suoraan. Ohjelmien tuontiominaisuudet on esitetty ohjelmien ominaisuuksien vertailun luvussa 7.2.15.

6.4.1 Ohjelma A

Mallin rakentaminen alkaa ohjelmassa A valitsemalla käytettävät yksiköt ja halutut laskentamenetelmät (kuva 44). Laskenta voidaan tehdä Saint Venantin aaltoyhtälön sovelluksilla (dynaaminen, kinemaattinen aaltoyhtälö tai pysyvä virtaus). Nimeämistä varten voi valita käytettävät lyhenteet ja luoda oletusarvot luotaville elementeille.

Kuva 44. Ohjelma A, mallinnuksessa käytettävät laskentamenetelmät.

Alussa valittuja yksikköjä ei voi muuttaa kesken mallinnusta, koska syötetyt arvot eivät muunnu automaattisesti yksikköä vaihdettaessa. Valittavia yksikkövaihtoehtoja esimerkiksi virtaaman suhteen on kolme kappaletta SI yksikössä.

Tehdyt laskentamenetelmien valinnat vaikuttavat elementteihin syötettäviin ominaisuuksiin. Elementtiin täytettävät tiedot päivittyvät vastaamaan valittua laskentamenetelmää. Kuvassa 45 on esitetty valuma-alueen täytettäviä tietoja kahdella eri laskentamenetelmällä.

Subbasins

General
Subbasin ID: Sub-01
Connectivity
Rain gage:
Outlet node/subbasin:
Delete
Show
Report

Description:

Physical Properties **Flow Properties**

Physical properties
Area: 172.559 ha
Equivalent width: 150 m
Average slope: 0.5 %
Time of concentration:
Weighted curve number:
Impervious area: 25 %
Area: 25 %
No depression: 25 %
Manning's roughness: 0.015
Depression depth: 2.00 mm
Previous area:
Depression depth: 5.00 mm
Manning's roughness: 0.1
Analysis summary
Peak runoff: N/A lps
Total runoff: N/A mm
TOC (days hh:mm:ss): N/A
Total infiltration: N/A mm

Subbasin ID /	Area	Max Infil. Rate	Min Infil. Rate	Drying Time
1 Sub-01	172.559	3.0	0.15	7

Close
Help

Subbasins

General
Subbasin ID: Sub-01
Connectivity
Rain gage:
Outlet node:
Delete
Show
Report

Description:

Physical Properties **Runoff Coefficient**

Physical properties
Area: 172.559 ha
Flow length: 150 m
Average slope: 0.5 %
Time of concentration: 7.09 min
Weighted runoff coeff: 0.72
Impervious area: 25 %
Area: 25 %
No depression: 25 %
Manning's roughness: 0.015
Depression depth: 2.00 mm
Previous area:
Depression depth: 5.00 mm
Manning's roughness: 0.1
Runoff coefficient:
Analysis summary
Peak runoff: N/A lps
Total runoff: N/A mm
Rainfall intensity: N/A mm/hr
Accumulated precipitation: N/A mm

Subbasin ID /	Area	Wt. Runoff Coeff.	Average Slope	Flow Length	TOC
1 Sub-01	172.559	0.72	0.5	150	7.09

Close
Help

Physical Properties **Flow Properties**

Flow properties
Max infiltration rate: 3.0 mm/hr
Min infiltration rate: 0.15 mm/hr
Land types: 0
Initial pollutants: NONE
Decay constant: 4 1/hrs
Curb & gutter length: 0 m
Drying time: 7 days
Groundwater aquifer: NO
Max volume: 0 mm
Snow pack:
Internal runoff routed: 100 %
Internal routing: Direct to outlet

Physical Properties **Runoff Coefficient**

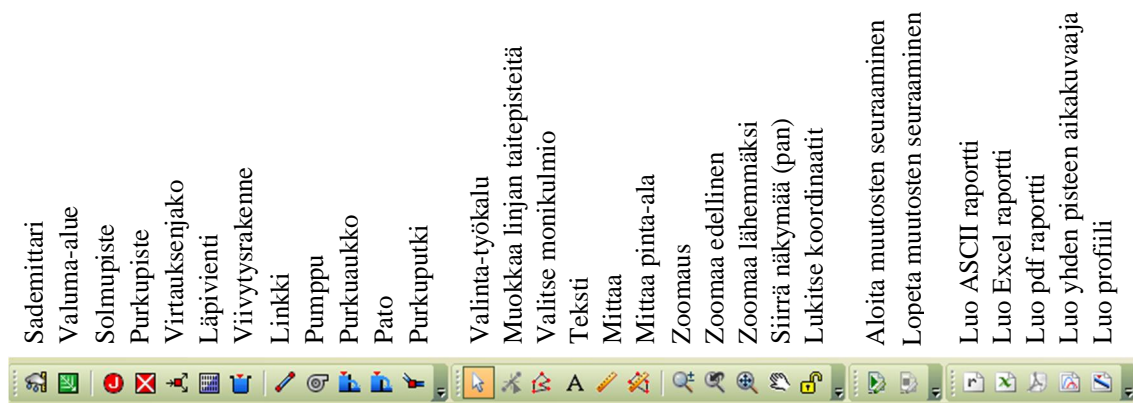
Composite runoff coefficient

Area (ha)	Area (%)	Runoff Coefficient	Soil Group	Description
1 172.559	100.00	0.72		
2				
3				
4				
5				
6				

Total area: 172.559 ha Total area: 100.00 % Weighted coeff: 0.72

Kuva 45. Laskentatavan vaikutus elementteihin syötettäviin lähtötietoihin ohjelmassa A. Vasemmalla osavaluma-alueisiin syötettävät tiedot, kun hydrauliseksi menetelmäksi on valittu SWMM ja suotautuminen lasketaan Hortonin metodilla. Oikean puoleiseen kuvaan laskentamenetelmäksi on valittu Modified Rational hydraulinen menetelmä ja Kirpichin valuma-aika menetelmä.

Kun perusasetukset on määrätty, voidaan aloittaa mallin rakentaminen. Malli voidaan rakentaa piirtämällä halutut solmupisteet, linjat ja osavaluma-alueet ohjelmalla esimerkiksi taustakartan päälle tai ohjelmaan voidaan tuoda tietoja (verkostokartta, solmupisteiden koordinaatit tai osavaluma-alueet) suoraan muista ohjelmista. Mallin rakentamiseen käytettävät työkalut on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. Työkalut mallin rakentamiseen, Ohjelma A

Käsin piirrettäessä malliin luodaan ensin solmupisteet kuten kaivot, viivytysrakenteet ja pumput. Solmupisteisiin syötetään korkeustiedot kuten linjan liitoskorkeus, kaivonkan-
nen korkeus yms. Linkki-työkalulla luodaan linja solmupisteiden välille. Linkin ominai-
suuksista valitaan onko kyseessä painelinja, viettolinja, rumpu, oja vai kanava. Linkki
ottaa suoraan liitoskorkeustiedot solmupisteistä. Solmupisteiden korkeustiedot voidaan
myös hakea linkin ominaisuusikkunan vesijuoksu-painikkeen tai suunnitteluvalikon
kautta.

Osavaluma-alueet piirretään ja alueen purkupiste (yleensä verkoston solmupiste) linkite-
tään alavetovalikosta valuma-alueen tietoihin. Solmupisteet kannattaa nimetä lyhyesti,
jotta linkin nimet mahtuvat alavetovalikon näkymään. Valitusta valuntamenetelmistä ja
laskentatavoista riippuen täytetään tarvittavat ominaisuustiedot osavaluma-alueiden
tietoihin.

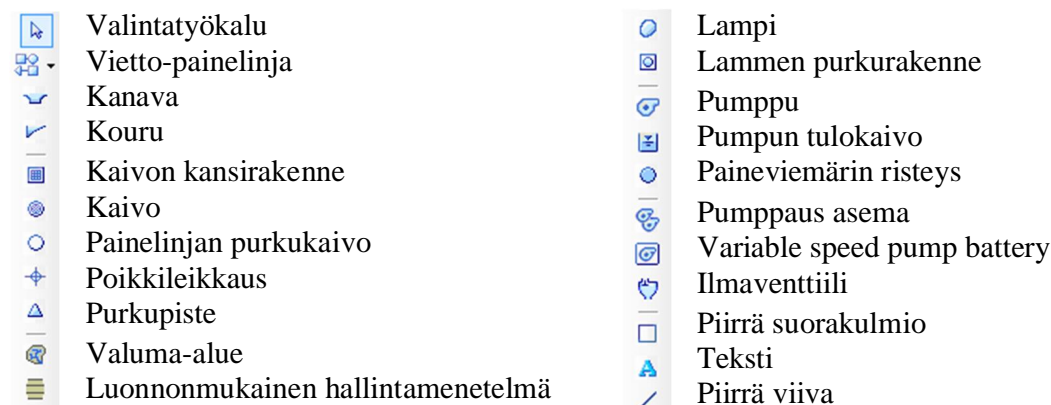
Mikäli linjoja tai alueita muokkaa, tiedot voi päivittää suunnitteluvalikon käskyllä laske
pinta-alat tai pituudet uudestaan. Yksittäiset, verkostoon kuulumattomat, yksinäiset
solmupisteet voi tuhota muokkausvalikon käskyllä tuhota yksinäiset solmupisteet.

Mallinnuksessa käytettävä sade luodaan valitusta laskentamenetelmästä riippuen sade-
mittari kuvakkeella tai sateen toistuvuuskäyrien (IDF) kuvakkeella. Käytettäessä sade-
mittari -sadetta, osavaluma-alueille voidaan määrittää erilaiset sadetapahtumat, jolloin
haluttu sadetapahtuma linkitetään osavaluma-alueen ominaistietoihin. IDF-sade on koko
valuma-alueelle aina sama.

6.4.2 Ohjelma B

Ennen mallin rakentamista tehdään yleiset määritykset käytettävistä yksiköistä (SI/US)
ja mallin esitystavasta (mittakaava/kaaviomainen). Tehtyjä yksikkövalintoja voidaan
muuttaa kesken mallinnuksen, koska ohjelma muuntaa jo syötetyt arvot uuteen yksik-
köön. Valittavia yksiköitä on paljon, esimerkiksi virtaamayksiköitä on 30 kpl. Valittuna

voi olla sekä SI että US järjestelmän yksiköitä samanaikaisesti. Mallin rakentamista varten käytettävissä olevat työkalut on esitetty kuvassa 47.

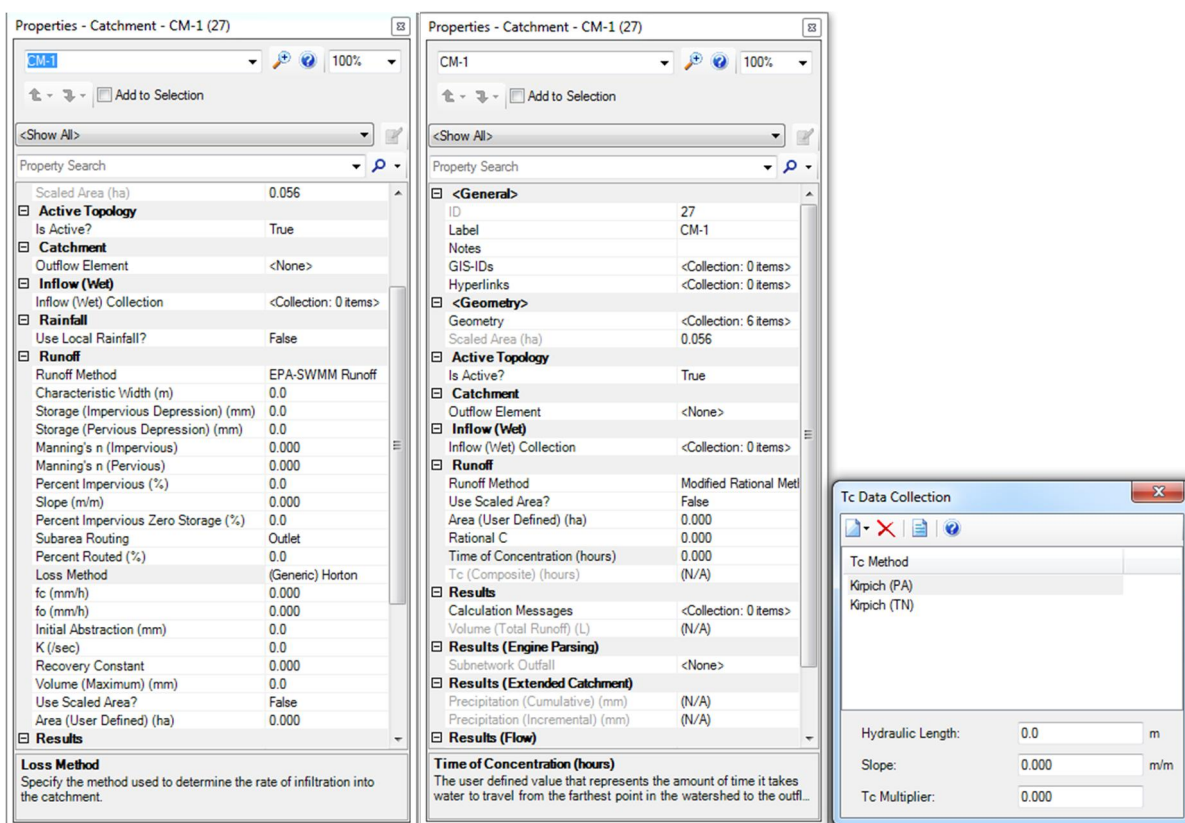


Kuva 47. Ohjelma B, piirtotyökalut

Mallin piirtäminen tapahtuu vietto-painelinja -kuvakkeella. Ensin valitaan halutaanko piirtää paine vai viettolinja, jonka jälkeen hiiren oikealla valitaan haluttu solmu ja linkkityyppi. Uusi solmu lisätään hiiren vasenta nappia painamalla ja samalla ohjelma piirtää linjan solmupisteiden väliin.

Solmupisteisiin syötetään halutut korkeustiedot, häviö- ja virtaamatiedot yms. Ohjelmassa on oletuksena, että kaivon kannenkorkeus on maanpinnan tasolla ja putket liittyvät solmupisteisiin annettujen vesijuoksun korkeuksien mukaisesti. Poikkeavissa tilanteissa vesijuoksun ja/tai kannen korkeus valitaan käyttäjän määrittelemäksi, jolloin haluttu korkeus annetaan manuaalisesti.

Valuma-alueet piirretään valuma-alue työkalulla. Valunta-alueeseen syötettävät ominaisuudet päivittyvät vastaamaan tehtyjä laskentamenetelmiä – näkyviin jäävät vain valittuihin menetelmiin liittyvät ominaisuudet. Valuntahydrologiaa ja valuma-aikaa vastaavat ohjelma B:n ominaisuusikkunat on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Laskentatavan vaikutus elementteihin syötettäviin lähtötietoihin ohjelmassa B. Vasemmalla osavalue-alueisiin syötettävät tiedot kun hydrauliseksi menetelmäksi on valittu SWMM ja suotautuminen lasketaan Hortonin metodilla. Oikean puoleiseen kuvaan laskentamenetelmiksi on valittu Modified Rational hydraulinen menetelmä ja Kirpichin valuma-aikamenetelmä.

Kun tarkasteltavan valuma-alueen ja verkoston perusominaisuudet on syötetty malliin, voidaan ohjelmaan rakentaa erilaisia tarkastelutilanteita. Tarkastelutilanteet muodostuvat skenaarioista (tarkastelutilanne) ja vaihtoehtoista (tilanteen ominaisuudet). Ominaisuudet on jaettu 16 valikkoon, joista perus mallinnuksista käytetyimpiä ovat aktiivisuus (onko elementti mukana mallinnuksessa), fysikaaliset ominaisuudet (halkaisija, karkeuskerroin, korkeudet...), rajaolosuhteet (esim. purkupisteen vedenpinnankorkeus), hydrologia (käytetty valumamenetelmä, valunta-aika...). Tarkastelutilanteita varten ohjelmaan voidaan luoda vaihtoehtoja kuten erilaisia putkien halkaisijoita, korkeustasoja, sadetilanteita, valunta-aikoja yms., joista halutut ominaisuusyhdistelmät valitaan mallinnettaviin skenaarioihin.

Ennen mallintamista määritetään käytettävät laskentaominaisuudet - kuten analysoidaanko rakennettua mallia, suunnitellaanko uutta verkostoa, simuloidaanko vai tarkastellaanko pysyvää vai muuttuvaa virtausta ja valitaan aika-askeleen pituus.

6.5 Mallinnustilanteet

Ohjelmien perusominaisuuksia vertailtiin manuaalista saatujen tietojen pohjalta. Teoreettisen vertailun lisäksi ohjelmien käytettävyyttä ja mallinnustulosten eroja vertailtiin mallintamalla kaksi samaa hulevesien muodostumistilannetta molemmilla ohjelmilla. Toinen mallinnustilanteista määritettiin myös hulevesioppaan mukaisella käsinlaskennalla.

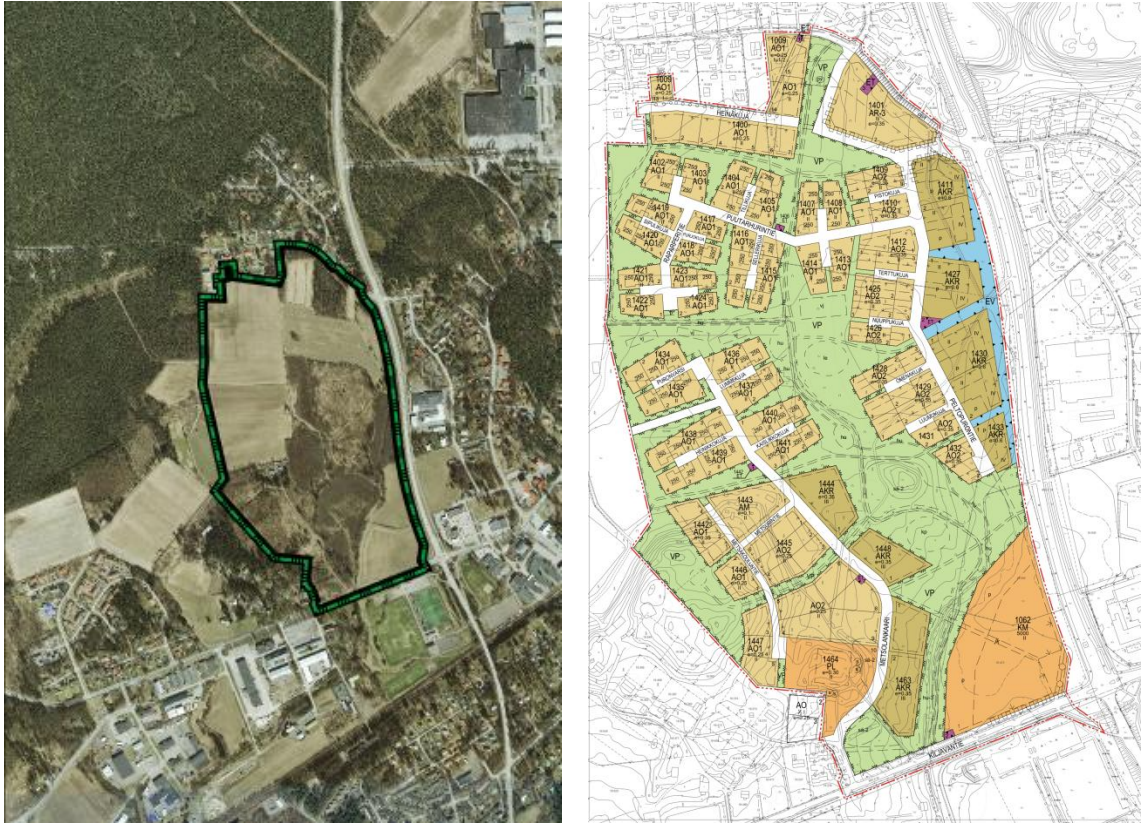
Ensimmäisessä mallinnustilanteessa verrataan nykyisen peltoalueen kaavoituksen vaikutuksia muodostuviin hulevesivirtaamiin ja viivytystarpeen suuruutta. Toisessa tilanteessa tarkastellaan rakennetun keskusta-alueen hulevesiverkoston riittävyyttä johtaa nykyiset mitoitusasteet. Mallinnustilanteiden tarkempi kuvaus on esitetty luvuissa 6.6 ja 6.7. Ohjelmien vertailussa käytetyt laskentaominaisuudet on koottu lukuun 6.8. Mallinnusohjelmien lisäksi mallinnustilanteen 1 viivytystarve lasketaan myös Hulevesioppaan (2012) mukaisella ohjeistuksella.

EIA-menetelmän (Sillanpää 2013) mukainen viivytystilavuuden tarve määritettiin molemmille mallinnustilanteille. Menetelmässä sateen määrä on 16 mm ja hulevettä muodostuu ainoastaan viemäriin suoraan yhdistetyiltä tiiviiltä alueilta. Toteutettu menetelmän sovellus on esitetty luvussa 6.9.

6.6 Mallinnustilanne 1: uuden alueen kaavoitus

Nurmijärven Kylänpäähän laadittiin hulevesiselvitys asemakaavan laatimista varten. Selvityksessä arvioitiin muodostuvia hulevesivirtaamia ja viivytystarvetta kaavamääräyksien ja varauksien laatimiseksi kaavoitusta varten. Kylänpään alue sijaitsee Rajamäen keskustan läheisyydessä.

Asemakaava-alueen pinta-ala on noin 48 ha. Asemakaava-alue on nykytilanteessa luonnontilaista metsää ja peltoa. Alueelle kaavoitetaan pääosin asutusta, alueen kaakkoisosaan suunnitellaan palvelukorttelia. Ilmakuva kaavoitusalueesta ja asemakaavaluonnos on esitetty kuvassa 49.



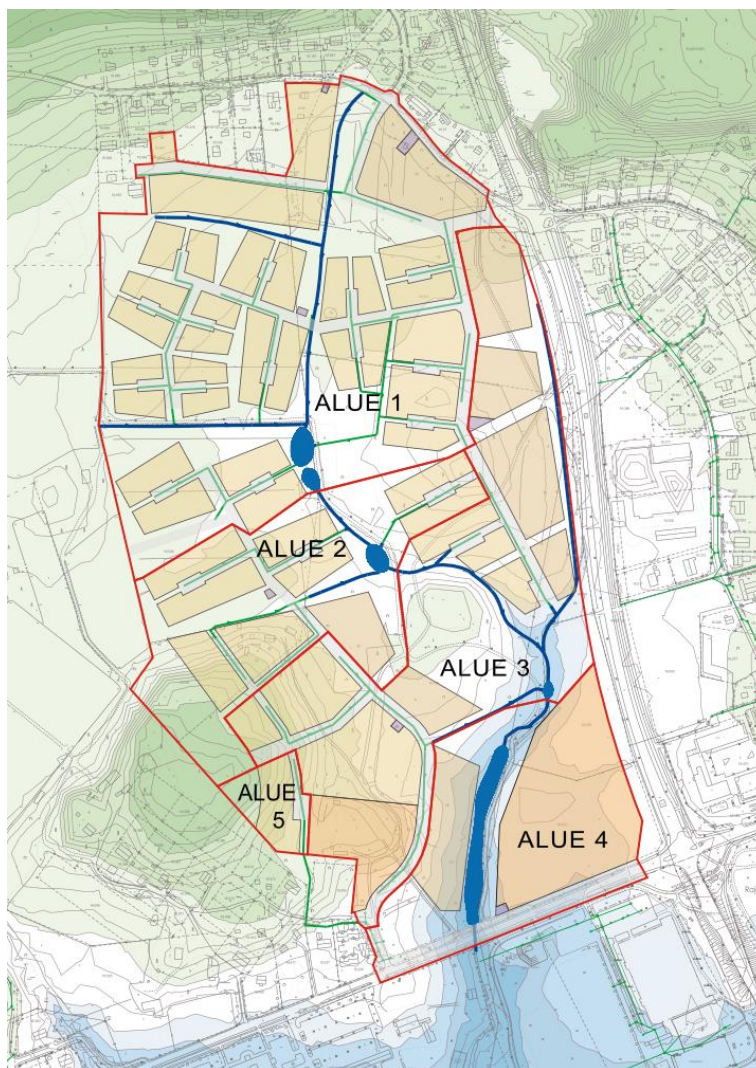
Kuva 49. Kylänpään asemakaava-alueen ilmakuva (vasemmalla) ja asemakaavaluonnos (oikealla).

Asemakaava-alueen yläpuolisen valuma-alueen koko on noin 110 ha. Asemakaavoitettava alue sijaitsee Matkunojan valuma-alueella, jonka pinta-ala on noin 19 km².

Asemakaava-alueelle esitetään toteutettavaksi monivaiheista ja hajautettua hulevesien hallintajärjestelmää. Hulevesien hallinta alkaa tonttien ja korttelien sisälle rakennetusta hajautetusta järjestelmästä ja jatkuu yleisillä alueilla hulevesien johtamisella, viivytteisellä ja käsittelyllä.

Mallinnustilanne

Korttelialueilla muodostuvat hulevedet kerätään asutusalueilta hulevesiviemäreitä pitkin viheralueilla sijaitsevien painanteiden tai puromaisten avo-ojien kautta keskitettyihin hulevesien viivytysrakenteisiin. Viheralueelle on varattu tilaa neljälle hulevesilammikolle (alueen 1 lammikot on laskettu yhtenä lammikkorakenteena). Valuma-aluejako, sekä keskitettyjen viivytysrakenteiden sijainti on esitetty kuvassa 50.



Kuva 50. Valuma-aluejako ja keskitettyjen viivytyksrakenteiden sijainti Kylänpään asemakaava-alueella. Valuma-alueen 1 lammikot on laskettu yhtenä rakenteena.

Mallinnuksen alueella tarkasteltiin tarvittavaa viivytystilavuutta viheralueilla. Ohjelma-vertailua varten valitut mitoitussateet on esitetty taulukossa 28.

Taulukko 28. Mallinnusvertailussa käytetyt mitoitussateet.

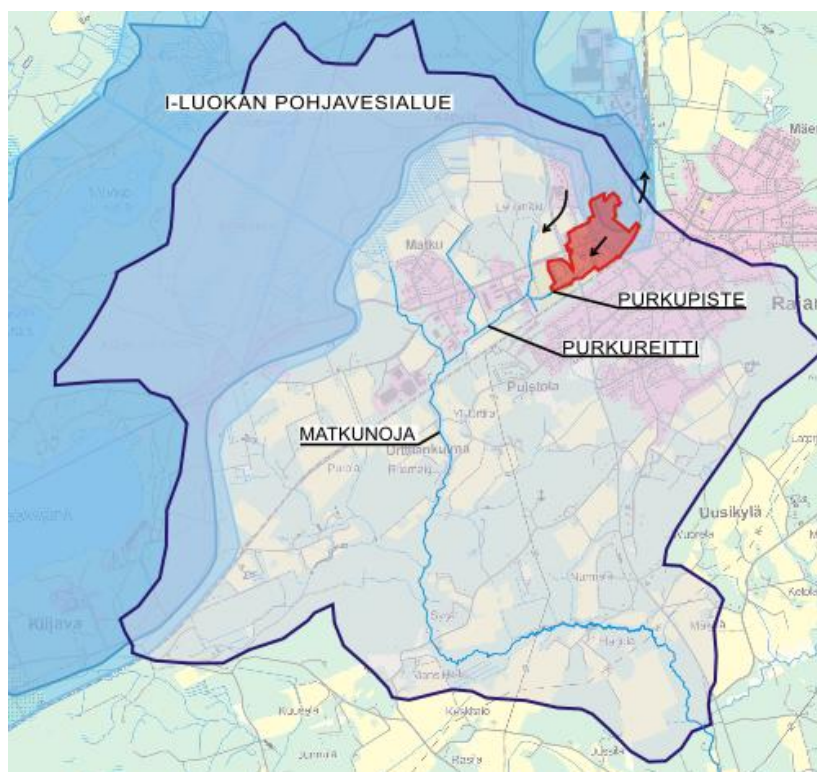
Mitoitussateen toistuvuus	Sateen kesto [min]	Sateen intensiteetti [mm/min]	[l/s*ha]	Kertymä mm
1/5a	60	0,32	53	19,2
1/5a, kasviuoneilmiön vaikutus	60	0,38	64	22,8

Mallinnuksessa avouomat oletettiin nurmipeitteisiksi (Manning 0,07) ja hulevesiviemärit muovisiksi (Manning 0,01). Viivytyksrakenteiden vertailutilavuus valittiin käsin laskettuun arvion perusteella.

6.7 Mallinnustilanne 2: rakennetun alueen kapasiteetti

Rajamäen keskusta-alueelle suunnitellaan kiertoliittymää ja samalla keskusta-alueen hulevesiviemäreitä uusitaan. Katusuunnittelualue sijaitsee Tykkimäentien, Patruunantien, Keskusraitin ja Kiljavantien väliin rakennettavan kiertoliittymän läheisyydessä. Suunnittelualueen hulevesiverkoston läpi virtaa noin 16 ha alueelta muodostuvat hulevedet. Koko tarkastelualueen pinta-ala on noin 21 ha. Rajamäen keskusta sijaitsee Matkunojan valuma-alueella, jonka pinta-ala on noin 19 km².

Katusuunnittelun lisäksi keskusta-alueelle ei ole suunniteltu huomattavia muutoksia: vettä läpäisemättömän pinnan osuus ei tule kasvamaan, koska suunnitelmassa uusitaan nykyisiä katurakenteita. Katusuunnittelualueelta muodostuvat hulevesivirtaamat voivat kuitenkin kasvaa nykyisestä, koska katujen uudet kuivatusjärjestelmät voivat olla nykyisiä järjestelmiä tehokkaampia. Suunnittelualueen sijainti ja hulevesien muodostuminen on esitetty kuvassa 51.



Kuva 51. Suunnittelualue (punaisella), Matkunojan valuma-alue, hulevesien purkureitti ja Rajamäen I-luokan pohjavesialue (sinisellä).

Suunnittelualueen nykyinen huleveden runkoviemäri kostuu betonisista ja muovisista halkaisijaltaan 225...400mm hulevesiviemäreistä. Hulevedet johdetaan Patruunantieltä, Tykkimäentieltä ja Keskusrailta Kiljavantien ja Kuntolanpolun kautta Rajamäen yläkoulun ja lukion lounaispuolella sijaitsevaan purkuojaan. Keskusraitin eteläpuoleiselta alueelta hulevedet johdetaan omaa linjaa pitkin samaan purkupisteeseen.

Hulevedet johdetaan ojassa Rajamäentien alitse. Rajamäentien jälkeen hulevedet viemäroidään 500B -runkojohtoa pitkin Pillistön urheilukenttien läheisyydessä sijaitsevaan hulevesialtaaseen.

Ratakujan alueen hulevedet johdetaan rautatien vieressä sijaitsevaan imeytyskaivoon. Hulevesien imeytyksestä ollaan luopumassa, koska imeytys ei ole toiminut riittävän tehokkaasti ja alueella on ollut hulevesitulvia. Myös Rajamäen yläkoulun ja lukion kiinteistöillä on havaittu tulvimista puutteellisten hulevesien keräys- ja johtamisjärjestelmien vuoksi.

Kaikkia hulevesiverkostoon liittyneitä kiinteistöjä ei tiedetä. Liitämiskohtailmoitusta ei löytynyt alueen kaikista kiinteistöistä, ja osaan ilmoituksista ei ole merkitty tietoja hulevesien osalta. Alueen maaperä on pohjaveden muodostumisalueella soraa, suurin osa alueesta on karkeaa hietaa, alueen lounaisosan maaperä on savea.

Suunnittelualueen käyttöön jäävät sekä uudet hulevesijohdot on esitetty kuvassa 52. Kuvassa ei näy käytöstä poistuvia verkosto-osuuksia. Kaavoitetut, rakentamattomat alueet on merkitty ilmakehuun valkoisella.



Kuva 52. Rajamäen mallinnusalue. Katusuunnittelualueen läpi johdettavat hulevedet muodostuvat tummennetulla alueella. Suunnittelualueen ja Pillistön urheilukentän välinen alue on esitetty vaalealla. Nykyinen, käyttöön jäävä hulevesiverkosto on merkitty kuvaan tumman vihreällä ja uudet linjat vaaleanvihreällä. Kaavoitetut, rakentamattomat alueet ja uimahallin laajennus on rajattu valkoisella.

Mallinnuksen avulla tarkasteltiin verkoston kapasiteettia, nykyisten linjojen saneeraustarvetta, mitoitettiin uudet hulevesilinjat sekä viivytystilavuudet Rajamäen yläkoulun ja lukion eteläpuolelle. Mallinnus tehtiin ohjelmalla A. Tarkastelun perusteella valittiin mitoitussateet ohjelmien vertailua varten. Vertailussa käytettävät mitoitussateet ja sateiden intensiteetit on esitetty taulukossa 29.

Taulukko 29. Käytetyt mitoitussateet mallinnustilanteessa 2. Taulukossa CDS-sade (Chicago Design Storm) on tehty Rankkasateet- ja kaupunkitulvat (2008) raportin kuvaajaa (kuvaa 37) mukaillen.

Mitoitettava rakenne ja sateen toistuvuus	Toistuvuus [min]	Kesto [min]	Intensiteetti [mm/min]	Kertymä [mm]
Viivytyksrakenne, 1/5a	1/5a	60	0,32	19,2
Verkosto, tasainen sade*	1/2a	15	0,60	9,0
Verkosto, CDS*	1/2a	20	0,2-2	10,8

* sateen intensiteetissä on huomioitu kasvihuoneilmiön vaikutus

Mallinnuksessa käytetyt imeynän arvot ovat kirjallisuusarvoja. Arvot on koottu taulukkoon 30. Laskennassa käytetyt rationaalisen menetelmän valumakertoimet, SWMM-menetelmässä käytetyt läpäisemättömän pinnan ja painannesäilyntä arvo on koottu taulukkoon 31.

Taulukko 30. Green ja Ampt -menetelmän imeynnän arvot. Arvot otettu ohjelman A manuaalista.

Maalaji	hydraulinen johtokyky [mm/h]	Kapillaarinen nostokorkeus [mm]	Lähtötilanne [-]
Sora	49	120	0,4
Karkea hieta	30	60	0,4
Savi	0,01	320	0,4

Taulukko 31. Osavaluma-alueiden pintavalunnan määrän laskemiseen käytetyt arvot SWMM-menetelmässä (TIA eli läpäisemättömän pinnan osuus ja painannesäilyntä) sekä rationaalisen menetelmän valuntakerroin.

Maankäyttö	SWMM-menetelmä		Rationaalisen menetelmän valumakerroin [-]
	TIA [%]	Painannesäilyntä [mm]	
Katto	100	0	0,9
Asfaltti	90	1	0,8
Sora	40	5	0,3
Viherpinta	0	7	0,2

Mallinnuksessa on käytetty seuraavia Manningin karkeuskertoimia:

- betoniputki 0,015
- muoviputki 0,01
- katto- ja asfalttipinta 0,015
- viherpinta 0,1

Mallinnuksessa ei ole huomioitu pohjavettä.

6.8 Ohjelmien vertailussa käytettävät laskentaominaisuudet

Ohjelmien vertailua varten valittiin seuraavat ominaisuudet, jotka on mahdollista toteuttaa molemmilla ohjelmilla:

- käytetään SI-yksiköitä, virtaamayksikkönä l/s
- korkeudet merkitään korkeustasona (elevation)
- viettolinjan hydraulisena laskentamenetelmänä käytetään Manningin menetelmää, painelinjan menetelmänä Hazen-Williamsia
- valunta lasketaan SWMM-menetelmällä ja sovelletulla rationaalisella menetelmällä
- SWMM-menetelmässä imeyntä lasketaan Green ja Ampt -menetelmällä
- sovelletun rationaalisen menetelmän valunta-aika on käyttäjän määrittelemä (valunta-aika lasketaan hulevesioppaan mukaisilla virtaamilla)
- hydraulinen laskenta joudutaan toteuttamaan eri laskentamenetelmillä. Ohjelmassa A käytetään dynaamista ja kinemaattista aaltoyhtälöä. Ohjelmassa B käytetään EPS:n backwater-laskentaa
- paikallishäviönä käytetään ohjelmalla B HEC-22 2.nd edition -verisota. Tulolinja liittyy kaivoon pohjalta tai pohjan yläpuolelta (pohjaa ei muotoiltu). Ohjelmaan A valitaan häviöt käsin linjaosuuskohtaisesti.

6.9 Viivytystarve EIA:n perusteella

Viivytystilavuuden tarve määritettiin molemmille mallinnustilanteille ohjelmalla A. Sateen määrä on laskennassa 16 mm ja hulevettä muodostuu ainoastaan viemäriin suoraan yhdistetyiltä tiiviiltä alueilta (EIA).

Molemmilla mallinnustilanteilla tarkasteltiin ensin pelkän 16 mm sademäärän vaikutusta viivytystarpeeseen. Mallinnuksessa sade oletettiin tasaiseksi ja sateen kestoksi 15, 30 ja/tai 60 minuuttia.

Mallinnustilanteessa 1 (Kylänpää) kortteli- ja katualueilta hulevesien muodostumisen oletetaan pienentyvän EIA:n ja TIA:n välisen suhteen verran. Muutos on laskettu kuvan 30 mukaisesti: $EIA = 1,082TIA - 0,133$. Lisäksi tarkistellaan paljonko puistoalueiden ja metsän hulevesikertoimen oletaminen nollassi vaikuttaa viivytystarpeeseen.

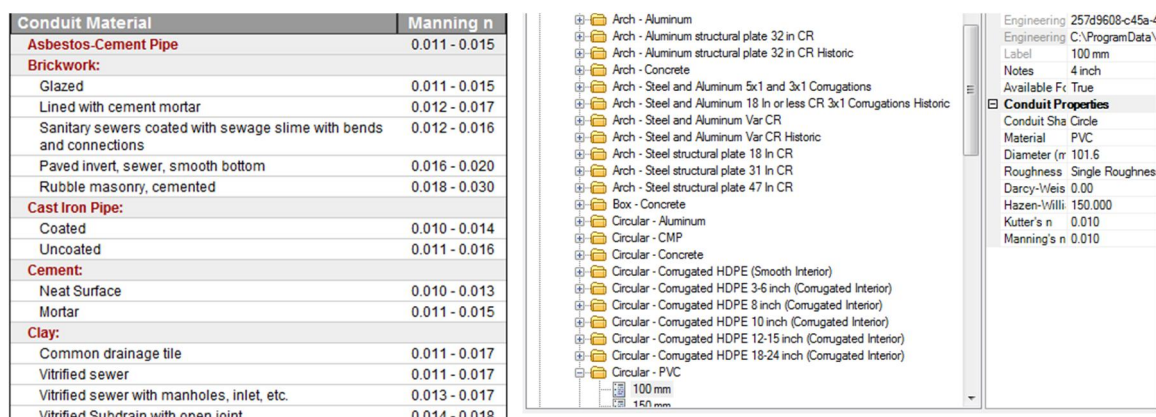
Mallinnustilanteessa 2 (Rajamäki) viivytystarve lasketaan SWMM-menetelmällä. Laskennassa läpäisevien pintojen painannehäviön määrä on 16 mm. EIA:n osuudet lasketaan TIA:n perusteella kuvan 30 mukaisesti. MRM-menetelmässä valumakerroin c lasketaan SWMM-menetelmän TIA:n määrän perusteella kuvan 31 mukaisesti: $C_{vol} = 0,661TIA - 0,069$.

7. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Ohjeistus ohjelmien käyttöön

Molempia ohjelmia varten on saatavilla pdf-muotoinen käyttöohje. Ohjeissa on kerrottu ohjelman perustoiminnoista ja laskentaperusteista. Ohjelma B:ssä ominaisuus-ikkunan alareunaan ilmestyy lyhyt kuvaus täytettävästä ominaisuustiedosta, jota ohjelmassa A ei ole. Usein tuo yhden–kahden lauseen selvennys auttaa muistamaan täytettävän kentän sisällön ilman manuaalin käyttöä.

Solmupisteiden ja linkkien tietoja annettaessa, ohjelmassa A syötettävän arvon vieressä olevasta painikkeesta aukeaa ikkuna käytetyistä kirjallisuusarvoista. Kirjallisuusarvojen lähteet on annettu avautuvan ikkunan alareunassa. Haluttua arvoa ei pysty valitsemaan suoraan valitsemalla, vaan arvo syötetään ohjelmaan manuaalisesti. Ohjelmassa B vastaavasta arvon vierestä aukeaa linkki alasvetovalikkoon tai materiaalikirjastoon. Valittu materiaali päivittyy ominaisuuskenttään suoraan, kun valinta on tehty. Tämä edellyttää kolmea-viittä klikkausta valittavasta ominaisuudesta riippuen. Kuvassa 53 on ote ohjelman A antamista Manningin karkeuskertoimista ja ohjelman B kirjastosta.



Kuva 53. Solmu ja linkkien ominaisuustietojen aputoimintoja. Ohjelmaa A avautuva pdf ikkuna vasemmalla ja materiaalikirjasto ohjelmasta B oikealla.

7.2 Ohjelmien ominaisuuksien vertailu

Ohjelmien vertailu on jaettu 15 lukuun, joissa esitetään käytettävissä olevat laskentamenetelmät, mallin rakentamistavat, tiedon tuonti- ja vientimuodot sekä tulosten esittämistavat.

7.2.1 Mallin rakentaminen

Molemmissa ohjelmissa verkoston ja valuma-alueiden piirtäminen manuaalisesti on työlästä, varsinkin jos on kyse laajoista verkostoalueista. Mallin rakentamista piirtämällä auttaa taustakuvan tuominen. Käytettävissä olevat taustakuvien tiedostomuodot on esitetty taulukossa 32.

Taulukko 32. *Taustan tuonti malliin.*

Taustatiedosto	Ohjelma A	Ohjelma B
CAD	DWG, DXF	DXF
GIS	-	Esri Shapefile
Kuva	JPEG, TIFF, PNG, Portable BitMap, Portable GrayMap, Portable PixelMap, Windows Metafile,	JPEG, TIFF, PNG, Portable BitMap, GIF, MrSID

Ohjelmaan A pystyi tuomaan suoraan dwg-muotoisen kuvan taustaksi, joka helpottaa piirtämistä oikeaan mittakaavaan. Ohjelmassa B dxf-muotoon tallennettu tiedosto ei auennut yhtä laadukkaana, vaan kuva oli hieman vääristynyt.

Ohjelmassa B mallin rakentaminen piirtämällä on ohjelmaa A nopeampaa, koska ohjelmassa pystyy piirtämään samanaikaisesti sekä solmut että linjat. Ohjelmassa A piirtämisen joutuu tekemään osissa: ensin solmut ja vasta sitten linkit.

Molempiin ohjelmiin pystyy tuomaan suoraan koordinaatti- ja aluetietoja. Tiedonsiirto on käsitelty luvussa 7.2.15.

7.2.2 Tietojen syöttö rakennettuun malliin

Molemmissa ohjelmissa ominaisuustiedot voidaan syöttää yksittäin elementin ominaisuustaulukkoon kaksoisklikkaamalla elementin kuvaketta. Molemmilla ohjelmissa tiedot voidaan syöttää elementtiryhmittäin taulukkoon, johon tietoja on nopeampi syöttää. Muokattavia elementtejä voidaan myös valita erilaisten rajausten avulla.

Molemmilla ohjelmissa useamman elementin arvoja pystyy muuttamaan samanaikaisesti. Ohjelmassa A muokkaustoiminto on hivenen monimutkaisempi: ensin pitää tehdä aluerajaus, jonka jälkeen valitaan rajatun alueen sisältä muokattava elementtityyppi ja sen ominaisuus. Ohjelmassa B muokkaukset pystyy tekemään heti ominaisuustaulukosta samanaikaisesti kaikkiin tai haun/suodatuksen kautta valittuihin elementteihin.

7.2.3 Syötetyn tiedon muuttaminen

Tietoa muutettaessa uusi tieto syötetään vanhan tiedon päälle samalla tavalla kuin syötettäessä tietoja ensimmäistä kertaa. Muutettaessa osavaluma-alueen pinta-alaa tai linkin pituutta, ohjelma B päivittää muuttuneet lähtötiedot heti, ohjelmassa A muutokset päi-

vittyvät vasta erillisellä käskyllä. Jos erillistä päivityskäskyä ei anna, ohjelma A tekee mallinnuksen vanhentuneella tiedolla.

Solmupisteiden sijaintia voidaan muuttaa siirtämällä niiden sijaintia kartalla tai muuttamalla niiden koordinaattitietoja. Ohjelmassa A koordinaattitietoja pääsee muuttamaan valitsemalla hiiren oikeanpuolen valikosta edit coordinates. Ohjelmassa B koordinaattitiedot ovat samassa taulukossa muiden ominaisuuksien kanssa.

Osavaluma-alueen muotoa pystyy muuttamaan ohjelmassa B valitsemalla halutun osavaluma-alueen aktiiviseksi ja siirtämällä alueen reunapisteitä. Ohjelmassa A ensin aktiivoida muokkaustoiminto pikakuvakkeella tai valikkokäskyllä, jonka jälkeen reunapisteitä voi siirtää.

Ohjelmassa A valittua yksikköä ei voi vaihtaa kesken mallinnuksen, koska ohjelma ei muunna jo syötettyjä arvoja. Ohjelma B muuntaa syötetyt arvot haluttuun uuteen yksikkömuotoon.

Ohjelmassa A on vaarana tehdä laskenta vanhentuneilla tiedoilla, mikäli pituus/pinta-alan päivityskäskyn teko unohtuu. Ohjelma ei varoita päivitystarpeesta laskentaa suoritettaessa.

7.2.4 Sadetiedot

IDF-sadetiedot voidaan antaa molemmissa ohjelmissa lineaarisena tai logaritmisena yhtälönä tai käyttäjän määrittämänä taulukkotietona. Ohjelmassa B on lisäksi Hydro-35 menetelmä, jossa taulukkoon syötetään 5, 15 ja 60 minuutin sademäärä 2 ja 100 vuoden toistuvuudella. Tietojen perusteella menetelmä tuottaa IDF-käyrän 5, 10, 15, 30 ja 60 minuutin sateille 2, 5, 10, 25, 50 ja 100 vuoden toistuvuuksille.

Intensiteetiltään vaihtelevat sateet voidaan syöttää molempiin ohjelmiin intensiteettinä ajan suhteen tai kumulatiivisena sademääränä. Sateelle annetaan aika-askel ja lumelle korjauskerroin (vesipitoisuus). Sade voi olla käyttäjän määrittelemä, sadetietoihin täytetään aika sateen alusta ja sademäärä. Ohjelmassa A sadetiedot voidaan syöttää vain yhdessä muodossa (mm/h, aika hh:mm). Ohjelmassa B käytettävissä olevia yksiköjä on enemmän.

Ohjelmassa A käytettävissä on valmiita sateita ja ne on mahdollista sovittaa USA:n eri osavaltioille. Valittavissa on myös Chicago design storm -sade. Sateelle voi valita toistuvuuden 1-100 vuoden väliltä ja halutun kokonaissademäärän, mutta sateen kestoa (1 vrk) ei voi muokata. Käyttäjä voi luoda haluamansa sateen syöttämällä sadetiedot ohjelmaan käsin tai siirtämällä Excelistä.

Ohjelmassa B valmiita sateita on vähemmän, eikä CDS-sade ole valittavissa vaihtoehtoisissa. Käyttäjä voi luoda myös ohjelmassa B haluamansa sateen itse joko syöttämällä sadetiedot suoraan ohjelmaan, kopioimalla sadetiedot Excelistä tai tuomalla ohjelmaan.

7.2.5 Hydraulinen laskenta

Molemmilla ohjelmilla pystytään mallintamaan pysyvää virtaamaa (steady state) ja muuttuvaa virtaamaa. Koska ohjelmalla A on mahdollista käyttää dynaamista aaltoyhtälöä, se soveltuu paremmin huleveden valunnan ja verkoston täyttymisen ja virtaaman mallintamiseen. Dynaamisen aaltoyhtälön käyttö mahdollistaa hulevesiviemärin paineistumisen (virtaama putkessa voi ylittää täyden putken kapasiteetin), purkupisteen vedenkorkeuden huomioimisen, varastoitumista verkostoon, ja negatiivisen linjakaltevuuden virtauksen laskentaan. Kinemaattisella aaltoyhtälöllä negatiivista linjakaltevuutta ei voida laskea. Ohjelmassa B linjan kaltevuus voi olla negatiivinen. Ohjelman laskenta-arvoihin negatiivisille linjaosuuksille voi antaa minimiarvon convex C:lle (suositus 0,3...0,5), jolloin virtaamat eivät muodostu epärealistisen kokoisiksi.

Molemmissa ohjelmissa paikallishäviöt lisätään erikseen. Ohjelmassa A paikallishäviöarvot annetaan itse jokaiselle linkille erikseen ja käytettävissä on yksi laskentamenetelmä. Ohjelmassa B paikallishäviöt annetaan kaivoille. Käytettävissä on kuusi laskentamenetelmää. Osassa menetelmistä arvot annetaan itse, HEC-22- ja AASHTO-menetelmissä ohjelmaan on syötetty arvot valmiiksi ja käyttäjän tarvitsee valita ainoastaan kaivon pohjan muotoilutapa.

Ohjelma A:n dynaaminen aaltoyhtälö mahdollistaa useamman purkureitin lisäämisen kaivorakenteeseen, eli ns. dual drainage -mallintamisen. Eli kaivosta ylivuotava vesi voidaan ohjata reunakivellistä katurakennetta pitkin kadun kaltevuuksien mukaisesti eteenpäin. Tämä mahdollistaa tulvareitin mallintamisen. Käytettäessä dynaamista aaltoyhtälöä kaivosta voi olla myös useampi purkusuunta. Kinemaattinen aaltoyhtälö (ohjelma A) ja Convex-laskentamenetelmä (ohjelma B) mahdollistavat virtauksenjakorakenteen käytön. Molemmilla ohjelmilla on mahdollista laskea lisäksi tasaisia virtaamatilanteita.

Kapasiteetin ylittyessä ja kaivon tulviessa tulviva vesi voi poistua laskennasta. Ohjelmassa A tulvivat vedet voivat myös lammikoitua kaivon tietoihin syötetyn lammikoitumispinta-alan mukaisesti. Lammikoitunut vesi palaa kaivon kautta hulevesilinjaan kapasiteetin vapautuessa. Jos lammikoitumiselle ei ole annettu arvoa, tulvivat vedet poistuvat laskentamallista. Ohjelmassa B lammikoitumisvaihtoehtoa ei ole, mutta kaivon kansi voidaan pultata kiinni, jolloin putki paineistuu.

7.2.6 Aika-askeleen pituus ja laskenta-aika

Molemmissa ohjelmissa valittu laskentamenetelmä vaikuttaa aika-askeleen pituuteen. Ohjelmassa A suositus aika-askeleen pituudeksi on minuutti tai vähemmän käytettäessä dynaamista aaltoyhtälöä, 5-15 minuuttia kinemaattisella aikayhtälöllä. Ohjelmassa B aika-askeleen pituutta ei voida määrittää tieteellisesti. Ohjelman manuaalissa hydrologiseksi aika-askeleen oletusarvoksi annetaan 0,1 tuntia ja hydraulisen aika-askelen pituudeksi 1 tunti.

Ohjelma A:ssa mallinnus tapahtui muutamissa sekunneissa laskentatavan ja aika-askeleen pituudesta riippumatta. Ohjelmassa B aika-askeleen pituus ja laskennan pituus vaikuttavat huomattavasti laskennan sujuvuuteen.

Rajanmäen mallinnuksessa SWMM-laskentamenetelmässä aika-askeleen pituus oli 1 sekunti käytettäessä dynaamista ja kinemaattista aaltoyhtälöä. Sovelletussa rationaalisessa menetelmässä aika-askeleen pituutta ei voinut valita. Ohjelmassa B aika-askeleen pituus oli SWMM-laskennassa 5-20 sekuntia ja rationaalisella menetelmällä 15-40 sekuntia. Pienemmillä aika-askeleen pituuksilla ohjelma B ei saanut verkostoa tasapainoon.

7.2.7 Määrällisen ja laadullisen hallinnan työkalut

Hulevesien määrälliseen hallintaan käytettävät työkalut on koottu taulukkoon 33.

Taulukko 33. *Määrällinen hallinta*

Menetelmä	Ohjelma A	Ohjelma B
Viivytyks rakenne	Funktionaalinen Syvyys-pinta-alakäyrä Syvyys-tilavuuskäyrä Maanalaiset viivytyks rakenteet (Yksikkötietoja putki-, kammio- ja kasettirakenteista)	Funktionaalinen Syvyys-pinta-alakäyrä Syvyys-tilavuuskäyrä Putki Kammio
Viivytyksen purkurakenne	Purkurakenne Purkuaukko Pato	Purkuaukko Pato Nousujohto Rumpu Vortex venttiili Käyttäjän määrittelemä virtaama taulukkona
Luonnonmukaiset hallintamenetelmät	-	Sadepuutarha Imeytys- tai suodatusrakenne Läpäisevä päällyste Hulevesitynnyrit (kattovesien keräys) Painanne
Virtauksenjako	Pato Ylivuoto Virtaama* Käyttäjän määrittämä**	Virtaama* Käyttäjän määrittämä**

* annetun virtaaman ylittävä osuus

** taulukoitu, virtaaman suhteen muuttuva jakoaste

Ohjelmassa A:ssa oli paljon valmiita luettelotietoja kammio- ja kasettirakenteista. Ohjelmassa oli myös monipuolisemmat virtauksenjakovaihtoehdot. Ohjelmasta A kuitenkin puuttui kokonaan luonnonmukaiset hallintamenetelmät, jotka kuuluivat ohjelman B työkaluihin. Ohjelmassa B ei ollut käytettävissä valmiita kirjastoja hallintamenetelmille. Ohjelmassa B oli myös enemmän erilaisia viivytyks rakenteen purkuaukkorakenteita. Hulevesien laadullisen hallinnan menetelmät on koottu taulukkoon 34.

Taulukko 34. *Laadullinen hallinta SWMM-menetelmällä.*

Menetelmä	Ohjelma A	Ohjelma B*
Hulevesien käsitte- lyrakenne	Kaivo Virtauksenjako Viivytyksrakenne Purkupiste	Solmupisteet
Käsittelyn mallin- nustapa	Käyttäjän laatima matemaattinen laskentatapa	Funktio konsentraation tai pois- tuman suhteen
Suure, jonka suh- teen käsittelyä voi- daan mallintaa	Virtaama Vesikerroksen paksuus Solmupisteen pinta-ala Aika-askel Viipymäaika rakenteessa	Virtaama Vesikerroksen paksuus Pinta-ala Aika-askel Viipymäaika rakenteessa

* käyttö edellyttää ohjelman laskentamenetelmän päivytystä

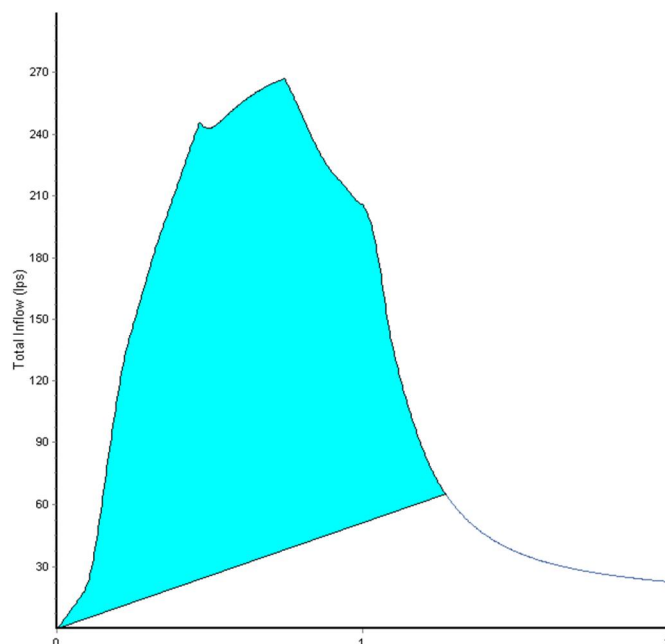
Laadullisen hallinnan suhteen ohjelmien välillä ei ollut huomattavia eroja. Ohjelma B:llä laadullisen hallinnan hyödyntäminen edellyttää laskentamenetelmän päivittämistä.

7.2.8 Viivytyksrakenne

Ohjelmassa B viivytyksrakenteiden huomiointitapaan vaikuttaa valittu laskentamenetelmä (stationäärinen tai EPS). Käytettäessä stationääristä laskentamenetelmää rakenteeseen tuleva virtaama on sama kuin lähtövirtaama. Vedenpinnankorkeus rakenteessa määritetään kontrolloivan rakenteen perusteella. Jos tätä ei ole, vedenpinta on sama kuin käyttäjän antama alkutilanteen vedenpinnankorkeus. EPS laskenta ei huomioi purkupisteen vedenpinnankorkeutta (tailwater), mutta käyttää tulovirtaamaa, viivytyksrakenteen vedenpinnankorkeutta ja purkurakennetta purkuvirtaaman määrittämiseen.

Ohjelmassa A dynaaminen aaltoyhtälö mahdollistaa viivytyksrakenteen mallintamisen ”täydellisesti”. Laskenta huomioi niin purkupisteen vedenpinnankorkeuden, viivytyksrakenteen vedenpinnankorkeuden kuin purkurakenteen vaikutuksen virtaamaan. Kinemaattista aaltoyhtälöä käytettäessä purkupisteen vedenpinnankorkeutta ei mallinneta ja viivytyksrakenteiden purkurakenteet lasketaan tavanomaisena putkena.

Manuaalin perusteella ohjelmalla A voidaan laskea tarvittava viivytystilavuus annetun maksimipurkuvirtaaman suhteen. Toimintoa kokeiltiin Kylänpään valuma-alueelle 3. Sallituksi purkuvirtaamaksi annettiin nykytilanteen mukainen huippuvirtaama 65 l/s. Ohjelma esittää viivytystarpeen graafisesti (kuva 54) ja tilavuusarvona. Viivytystarve valuma-alueella oli ohjelman tietojen perusteella 754 000 m³. Saatua tilavuus on viisi kertaa suurempi kuin alueelle satanut vesimäärää 150 000 m³. Viivytystarpeen pinta-alan (kuvassa sinisellä) perusteella arvioituna viivytystarve on lähempänä 750 m³:ta.



Kuva 54. Viivytystilavuuden määrittäminen ohjelmalla A. Värjätty pinta-ala vastaa viivytystarvetta, kun sallituksi purkuvirtaamaksi on asetettu 65 l/s. Viivytystarpeeksi ohjelma antaa 754 000 m³. Pinta-alan perusteella arvioituna 750 m³ on lähempänä totuutta.

Viivytystarvetta selvitettiin iteroimalla kahdella eri viivytysrakenteen koolla. Viivytysrakenteiden tiedot on esitetty taulukossa 35.

Taulukko 35. Viivytystilavuuden arviointi iteroimalla. Purkuaukon halkaisija valittiin vastaamaan suurinta sallittua 65 l/s purkuvirtaamaa.

Parametri	Yksikkö	Rakenne 1	Rakenne 2
Pinta-ala	m ²	750	1500
Korkeus	m	1	0,5
Purkuaukon halkaisija	mm	200	240
Vedenpinnan huippukorkeus	m	0,74	0,47
Vettä rakenteessa	m ³	550	705

Iteroinnin perusteella ohjelma A:n antama viivytystarve on noin 1000 kertaa tarvittavaa tilavuutta suurempi, kun vesikerroksen paksuus viivytysrakenteessa on noin 0,5 metriä.

7.2.9 Kaivojen nielu- ja purkuhäviöt

Ohjelmassa B on valittavana 6 laskentamenetelmää, joilla määritetään kaivojen nielu- ja purkuhäviöt. Laskentamenetelmillä on erilaisia lisämääreitä, kuten kaivon pohjan muotoilu, joka pitää valita. Osaan laskentamenetelmistä käyttäjän tulee itse syöttää haluamansa kertoimet kaivokohtaisesti. Absoluuttisessa menetelmässä annetaan häviö vakiona, johon virtausnopeus ei vaikuta. Yleisessä ja geneerisessä menetelmissä käyttäjä antaa kaivokohtaiset kertoimet häviöiden laskemiseksi, mutta virtausnopeus vaikuttaa hä-

viön suuruuteen. HEC-22-menetelmät ja AASHTO-menetelmä laskevat valitun kaivon muotoilun perusteella kaivossa muodostuvat häviöt. HEC-22-menetelmästä on valittavissa 2. ja 3. versio.

Taulukkoon 36 on koottu nielu- ja purkumenetelmien vaikutus tulvivien kaivojen määrään, vedenpinnankorkeuteen kaivoissa ja täysien putkiosuuksien määrään. Taulukon 36 ”ei häviöitä” on muodostettu absoluuttisella menetelmällä antamalla häviön suuruudeksi 0. Tarkastelu on tehty 2. mallinnustilanteelle 60 minuutin sateella, kun sateen intensiteetti on 53 l/s hehtaarille.

Taulukko 36. *Häviömenetelmän valinta linjan toimintaan ohjelmassa B. Tulvivien kaivojen ja täysien linjojen lukumäärän lisäksi on esitetty muutos kaivon vedenpinnankorkeudessa (80 % ja 90 % muutoksista sekä maksimi) verrattuna tilanteeseen jossa häviöitä ei ole huomioitu (ei häviöitä). Putki täynnä tarkoittaa että vedenpinnankorkeus kaivoissa on putken laen yläpuolella (virtaama ei välttämättä ole täyden putken virtaaman suuruinen).*

Menetelmä	Menetelmän valittu lisämääre	Tulvivia kaivoja [kpl]	Fraktiili 80 % [m]	Fraktiili 90 % [m]	Max [m]	Putki täynnä [kpl]
Ei häviöitä	-	2	-	-	-	28
AASHTO	none	4	0,2	0,3	0,8	51
AASHTO	full	3	0,1	0,1	0,4	33
Geneerinen		4	<0,05	<0,05	1,0	32
HEC-22, 2 nd	depressed/flat	3	0,1	0,1	0,5	34
	half	2	<0,05	0,1	0,4	29
	full	2	<0,05	<0,05	0,3	29
	improved	3	0,1	0,1	0,5	34
	none	2	<0,05	<0,05	0,3	29
HEC-22, 3 rd	depressed/flat	49	2,1	2,2	2,7	76
	full	49	2,1	2,2	2,7	75
Yleinen	-	3	0,2	0,2	0,5	43

Vertailun perusteella HEC-22:n 3. versio antaa huomattavan paljon suuremmat häviöt muihin menetelmiin verrattuna, jonka vuoksi noin puolet kaivoista tulvii, keskimääräinen vedenpinnankorkeus nousee yli metrin, suurimmillaan jopa 2,7 metriä. Linjoista noin 80 % on täynnä.

Kun häviöitä ei huomioida, tulvivia kaivoja on kaksi. Muut häviömenetelmät nostavat tulvivien kaivojen määrää 1-2:lla. Vedenpinnankorkeuden muutos on 90 %:lla kaivoista 10 cm tai vähemmän. Suurimmat muutokset ovat keskimäärin 50 cm.

Vedenpinnankorkeuden nousu kaivoissa vaikuttaa täysien linjaosuuksien määrään, mutta ei vaikuta virtausnopeuteen linjassa. Linja on täynnä, kun vedenpinnankorkeus kaivoissa on putken laen yläpuolella. Kun häviöitä ei huomioida, täysiä linjaosuuksia on 28 kappaletta. Häviöt nostavat täysien linjaosuuksien määrän noin 30-50 kappaleeseen.

Ohjelmassa A menetelmiä ei voi valita ja käyttäjä itse joutuu antamaan häviökertoimet jokaiselle kaivon johtavalle linjaosuudelle. Häviökertoimien vaikutukset on koottu taulukkoon 37.

Taulukko 37. *Häviömenetelmän valinta linjan toimintaan ohjelmassa A. Tulvivien kaivojen ja täysien linjojen lukumäärän lisäksi on esitetty muutos kaivon vedenpinnankorkeudessa (80 % ja 90 % muutoksista sekä maksimi) verrattuna tilanteeseen jossa häviöitä ei ole huomioitu (ei häviöitä). Putki täynnä tarkoittaa, että vedenpinnankorkeus kaivoissa on putken laen yläpuolella (virtaama ei välttämättä ole täyden putken virtaaman suuruinen).*

Menetelmä	Tulvivia kaivoja [kpl]	Fraktiili 80 % [m]	Fraktiili 90 % [m]	Max [m]	Putki täynnä [kpl]
Ei häviöitä	0		-	-	14
On häviöt	0	0,1	0,1	0,4	17

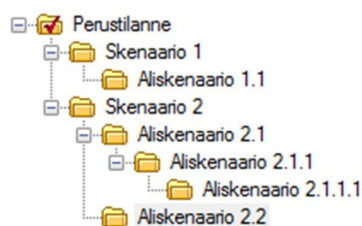
Ohjelmassa A muodostuvat nielu- ja purkuhäviöt ovat suhteellisen pienet. Häviöiden vaikutuksesta vedenpinnankorkeus nousee 90 % kaivoista 10 cm. Suurimmillaan muutos on 40 cm. Laskentamenetelmän vaikutus on 80 % ja 90 % kaivoissa samaa suuruusluokkaa HEC-2 -menetelmän 2. version depressed/flat ja improved muotoilun kanssa.

7.2.10 Mallinnettavat tilanteet

Ohjelmassa B mallinnettavat tilanteet muodostuvat skenaarioista (tarkastelutilanne) ja vaihtoehtoista (tilanteen ominaisuudet). Puumainen rakenne skenaarioissa mahdollistaa mallinnettavien tilanteiden luokittelun tehtyjen muutoksien suhteen. Ominaisuuksien puumainen rakenne mahdollistaa muutosten tekemisen useampaan vaihtoehtoon samanaikaisesti. Rakenne myös mahdollistaa edellisiin tai alkuperäiseen mallinnustilanteeseen palaamisen. Vaihtoehtojen ja ominaisuuksien muutosten kanssa joutuu olemaan tarkkana -muuten tehdyt muutokset voivat mennä sekaisin. Esimerkki ohjelma B:n skenaariorakenteesta on esitetty kuvassa 55.

Ohjelmassa A mallista voi tallentaa vaiheita Track Changes -valinnalla. Vaiheista muodostuu listaus, jossa vaiheet esiintyvät luomis- ja/tai lataamisjärjestyksessä. Esimerkki muutosten seurannan listasta on esitetty kuvassa 55. Vaiheista muodostuva listaus tyhjenee mallia suljettaessa. Säästettävät vaiheet tallennetaan omiksi tiedostoiksi. Koska skenaariorakennetta ei ole, muutokset joudutaan tekemään jokaiseen tiedostoon yksitellen.

Perustilanne
 Skenaario 1
 Skenaario 2
 Aliskenaario 2.1
 Aliskenaario 1.2
 Aliskenaario 2.1.1
 Aliskenaario 2.1.1.1
 Aliskenaario 2.2



Kuva 55. Muutosten seuranta ohjelma A (vasemmalla), skenaariorakenne ohjelmasta B (oikealla). Ohjelma A:n muutosten seuranta tyhjenee kun ohjelma suljetaan.

Ohjelmassa B on mahdollista hyödyntää aktiivisuustasoa mallinnuksen skenaariorakenneessa. Kun mallinnetaan tilannetta, jossa elementtiä ei ole, elementin tilaksi valitaan ei aktiivinen. Samalla elementti muuttuu karttapohjalla harmaaksi. Ohjelmassa A elementti poistetaan, mikäli sitä ei haluta käyttää sen hetkessä mallinnustilanteessa. Mikäli elementtiä taas tarvittaisiin myöhemmässä vaiheessa, se pitää joko luoda uudestaan, tai avata vaihe, jossa elementti on ollut mukana tai palata Track Changes -valikon kautta mallinnus vaiheeseen, jossa elementti on vielä ollut olemassa.

7.2.11 Mallinnettavien tilanteiden vertailu

Molemmissa ohjelmissa kahden mallinnetun tilanteen väliset erot voidaan selvittää vertaamalla. Ohjelmassa A vertailun tulokseksi saadaan lista, joka sisältää lisätyt, poistetut ja muutetut elementit (kuva 56). Muutettujen elementtien vanha ja uusi arvo annetaan omissa sarakkeissa. Moniportaisemman skenaariohallinnan vuoksi ohjelman B vertailu on monivaiheisempi ja lajitellumpi. Ohjelmassa B vertailun ensimmäisen vaiheen jälkeen nähdään erot skenaarioissa käytetyistä vaihtoehtoista. Vertaamalla vaihtoehtoja selviää erilaisten elementtien määrä sekä elementtien arvot verratuissa skenaarioissa. Esimerkki fysikaalisten vaihtojen vertailutuloksista on esitetty kuvassa 56. Ohjelmassa B voidaan verrata myös laskennassa tehtyjä muutoksia.

Compared states: "Skenaario 2.2" and "Skenaario 2.3"			
[ADDED ELEMENTS]			
Subbasin	Sub-04	Added	
[DELETED ELEMENTS]			
Subbasin	Sub-03	Deleted	
[MODIFIED ELEMENTS]			
Conveyance Link			
ID	Property	Old Value	New Value
Link-02	Shape Properties	Diameter: 0.75	Diameter: 0.6

Alternative: Active Topology		
Label	Is Active? Perustilanne	Is Active? Aliskenaario 2.1
O-5	True	False

Alternative: Physical		
Label	Diameter Perustilanne (mm)	Diameter Aliskenaario 2.1 (mm)
CO-1	304.8	150.0
CO-2	304.8	150.0

Kuva 56. Vaiheiden vertailu ohjelmalla A (vasemmalla) ja ohjelmalla B (oikealla). Ohjelmassa A lisätty/tuotettu elementti on toteutettu ohjelmassa B aktiivisuuden muutoksena. Molemmilla ohjelmilla myös elementtien fysikaalisia ominaisuuksia on muutettu.

7.2.12 Useampi purkuputki kaivosta

Ohjelmassa A käytetty laskentamenetelmä vaikuttaa verkostorakenteeseen. Käytettäessä dynaamista aaltoyhtälöä kaivosta voi olla useampi kuin yksi purkuputki ja ohjelma jakaa virtaaman automaattisesti korkeus yms. ominaisuuksien perusteella. Käytettäessä kinemaattista aaltoyhtälöä useampi purkusuunta voidaan toteuttaa virtauksenjako elementillä. Virtauksen jako voidaan toteuttaa neljällä tavalla: annetun virtaaman ylittävänä osuutena (cutoff), ylivirtaamana (overflow), jakokäyränä (flow diversion curve) ja ylisyyksypatona (weir).

Ohjelmassa B perusoletuksena on, että kaivolla on vain yksi purkuputki. Virtaaman jako voidaan kuitenkin toteuttaa valitsemalla linkin ominaisuuksista virtauksenjako aktiiviseksi. Virtaaman jako voidaan toteuttaa kahdella tavalla: annetun virtaaman ylittävänä (cutoff) tai laadittavan jakokäyrän (rating table) perusteella.

7.2.13 Tulosten esittäminen

Tuloksia voi tarkastella molemmissa ohjelmissa elementtikohtaisesti taulukoina tai yhteenvetoraportteina. Molemmissa ohjelmissa on valmiita raporttipohjia, joita voi muokata vastaamaan käyttötarvetta.

Tuloksia voi tarkastella taulukkomuodon lisäksi visuaalisesti. Esimerkiksi virtaamanmuutosta voi seurata mallinnuksen edetessä karttapohjalta tai pituusleikkauksista. Karttatarkastelua varten elementille tulee valita halutut ominaisuudet kuten väri ja koko halutuilla virtaamilla. Mallinnuksen edetessä linjojen värit ja koot vaihtuvat vastaamaan valittuja ominaisuuksia. Ohjelmassa A karttapohjan elementtityypeillä (osavaluma-alue, linkki, solmupiste) on 8-11 ominaisuutta, joita voidaan valita tarkasteltavaksi, kuitenkin vain yksi ominaisuus kerrallaan/elementtityyppi. Ohjelmassa B tarkasteltavia ominaisuuksia on paljon enemmän ja useampi valinta voi olla yhtä aikaa aktiivinen.

Halutuista linjaosuuksista voi tehdä pituusleikkauksen molemmilla ohjelmilla. Profiileista voi seurata esimerkiksi vedenpinnankorkeuden muutoksia mallinnuksen edetessä tai vedenpinnankorkeutta halutulla tarkasteluhetkellä.

Halutuista pisteistä, esimerkiksi viivytysrakenteen sijaintipisteestä voi määrittää virtaamakäyrän. Käyrä esittää pisteen läpi virtaavan vesimäärän ajan suhteen.

7.2.14 Tulosten vertailu

Ohjelmassa A analyysitulokset voi tallentaa omiksi tiedostoikseen, jotka voi hakea ohjelmaan myös sen jälkeen, kun alkuperäiseen mallinnustilanteeseen on tehty muutoksia. Tulokset eivät kuitenkaan päivitä elementin ominaisuuksia vastaamaan mallinnustilan-

netta. Useampi mallinnustulos voidaan valita aktiiviseksi, jolloin samaan pisteen virtaamakäyrää eri tilanteissa voidaan verrata.

Ohjelmassa B mallinnustulokset jäävät ohjelman muistiin ja valinnat päivittyvät vastaamaan aktiivista skenaariota. Myös ohjelmalla B on mahdollista luoda useammasta tilanteesta virtaamakäyrä vaihtoehtojen vertaamiseksi.

7.2.15 Tiedon siirto

Varsinkin suuremmilla alueilla tiedon syöttäminen malliin voi viedä paljon aikaa. Verkoston ja mallin luonti sujuvat molemmissa ohjelmissa huomattavasti nopeammin tuomalla lähtötiedot malliin suoraan rakentamisen sijaan. Molemmissa ohjelmissa on tuettu tiedonsiirtoa ohjelmiin (import) ja ohjelmista pois (export). Ohjelmissa on tiedonsiirron suhteen merkittäviä eroja sekä tuettujen tiedostomuotojen sekä siirrettävyyden helppokäyttöisyyden suhteen. Taulukkoon 38 on koottu tiedostomuodot, joita ohjelmiin A ja B voi siirtää. Taulukossa 39 on esitetty tiedostomuodot ja tulosten esittämismuodot, jotka voidaan tuoda mallista muihin ohjelmiin.

Taulukko 38. Tiedostomuodot jotka voidaan siirtää ohjelmaan (import).

Import	Ohjelma A	Ohjelma B
Valikosta: File → Import	Hydraflow Storm Sewer files	ohjelman b database -tiedosto
	GIS Import	ohjelman b alamalli (Submodel)
	SWMM (versio 5.0)	InRoads
	XPSWMM	Land XML
	Land XML	
Muut tuontitavat	Excel*	Access, CAD, dBase, Esri shapefiles, Excel, HTML, OLE DB, Oracle

*käyttö mahdollista vain osissa rakenteissa. Esimerkiksi sadetilanteissa mahdollista hyödyntää

Molemmilla ohjelmilla pystytään tuomaan tietoa malliin paikkatietona. LandXML muodossa tuodut verkostotiedot eivät siirtyneet mallinnusohjelmiin täydellisesti. Ohjelmassa A linjan vesijuoksu otettiin kaivon pohjan tasosta. Ohjelmassa B jokaisen putken loppupisteen vesijuoksun korkeus oli 0. Verkoston sijainti- ja pituustiedot siirtyivät korkeustietoja paremmin.

Ohjelmassa A on vähemmän tiedontuontimuotoja valittavana kuin ohjelmalla B. Esimerkiksi ohjelmaan A ei voi tuoda verkostotietoja Excelillä. Ohjelmassa B:n parempi Excel-yhteensopivuus mahdollistaa monipuolisemman ja toimintavarmemman tietojen tuonnin ohjelmaan erilaisista lähteistä, koska verkostotietojen siirto Excelin kautta sujui luotettavasti.

Ohjelmassa A jokainen tuotu tieto tallennetaan omaksi tiedostoksi, jotka yhdistetään merge-käskyllä osaksi varsinaista mallitiedostoa. Ohjelmassa B tietojen siirron voi teh-

dä suoraan oikeaan tiedostoon. Ohjelmassa B tietoja voi myös hakea uudestaan. Tietoa tuodessa voi valita haluaako, että muuttuneet tiedot päivitetään.

Taulukko 39. *Tiedostomuodot, jotka voidaan tuoda mallista muihin ohjelmiin (export).*

Export	Ohjelma A	Ohjelma B
Valikosta: File → Export	dwg, dxf SWMM (versio 5.0) GIS HEC-1 Hotsart Land XML Network coordinate file Hydraflow Storm Sewer file XPSWMM	dxf Land XML Submodels Publish-i model in Roads
Raportit	Excell ASCII pdf	Esri Shapefile Tab Delimited file Comma Delimited file XML
Pituusleikkaus	dwg, dxf Enhanced Metafiles, Bitmap Metafiles, Windows Metafiles	dxf Enhanced Metafiles, Bitmap Metafiles, JPEG, PNG, GIF, TIFF, VML, SVG, PDF, Post Script, XAML, FLEX
Virtaamakäyrä	dwg, dxf Enhanced Metafiles, Bitmap Metafiles, Windows Metafiles	Enhanced Metafiles, Bitmap Metafiles, JPEG, PNG, GIF, TIFF, VML, SVG, PDF, Post Script, XAML, FLEX
Animaatio mallinnus- tuloksista	Cinepac Codec by Radius DivX DV Video Encoder ffdshow Video Codec, ffshow video encoder Huffyuv Intel IYUV Microsoft RLE, Microsoft Video 1 MJPEG Compressor VP60® Simple Profile, VP61® Advanced Profile, VP62® Heightened Sharpness Profile Xvid MPEG-4 Coder	-

Molemmilla ohjelmilla on monipuoliset mahdollisuudet tietojen vientiin pois mallinnusohjelmista. Ohjelmilla saa vietyä pituusleikkaustietoa suoraan cad muotoisiin ohjelmiin, erilaisia kuvia, käyriä, taulukoita, vertailutiedostoja ja raportteja. Ohjelmassa A animaatiotulokset pystyy tuomaan ulos ohjelmasta, mutta ohjelmasta B ei.

7.3 Mallinnustilanteen 1 tulokset (Kylänpää)

Kaavoituksen vaikutusten arviointia varten luotiin kaksi mallinnustilannetta: nykytilanne ja kaavoitusta vastaava tilanne. Muodostuvien virtaamien perusteella määritettiin viivytyksen tarve. Mallinnustulosten vertailun vuoksi viivytyksrakenteen ominaisuudet pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman samankaltaisina (vakiopinta-ala ja sama purkuvirtaama).

Virtaamatulokset kaavoitusta ennen ja sen jälkeen on esitetty luvussa 7.3.1. Viivytystarpeen vertailu on koottu lukuun 7.3.2. Herkkyystarkastelu on esitetty luvussa 7.3.3. Sovellus EIA:n mukaisesta mitoituksista on luvussa 7.3.4.

7.3.1 Osavaluma-alueilta muodostuvat hulevesivirtaamat

Hulevesi virtaa osavaluma-alueelta 1 alueiden 2 ja 3 kautta alueelle 4. Osavaluma-alueelta 5 muodostuva hulevesivirtaama purkautuu alueen ulkopuolelle.

Osavaluma-alueelta purkautuva hulevesivirtaama ja virtaaman kertymä on esitetty seuraavassa kahdessa taulukossa. Taulukossa 40 on hulevesivirtaama nykytilanteessa ja taulukossa 41 on esitetty muodostuvat virtaamat kaavoitusta vastaavassa tilanteessa.

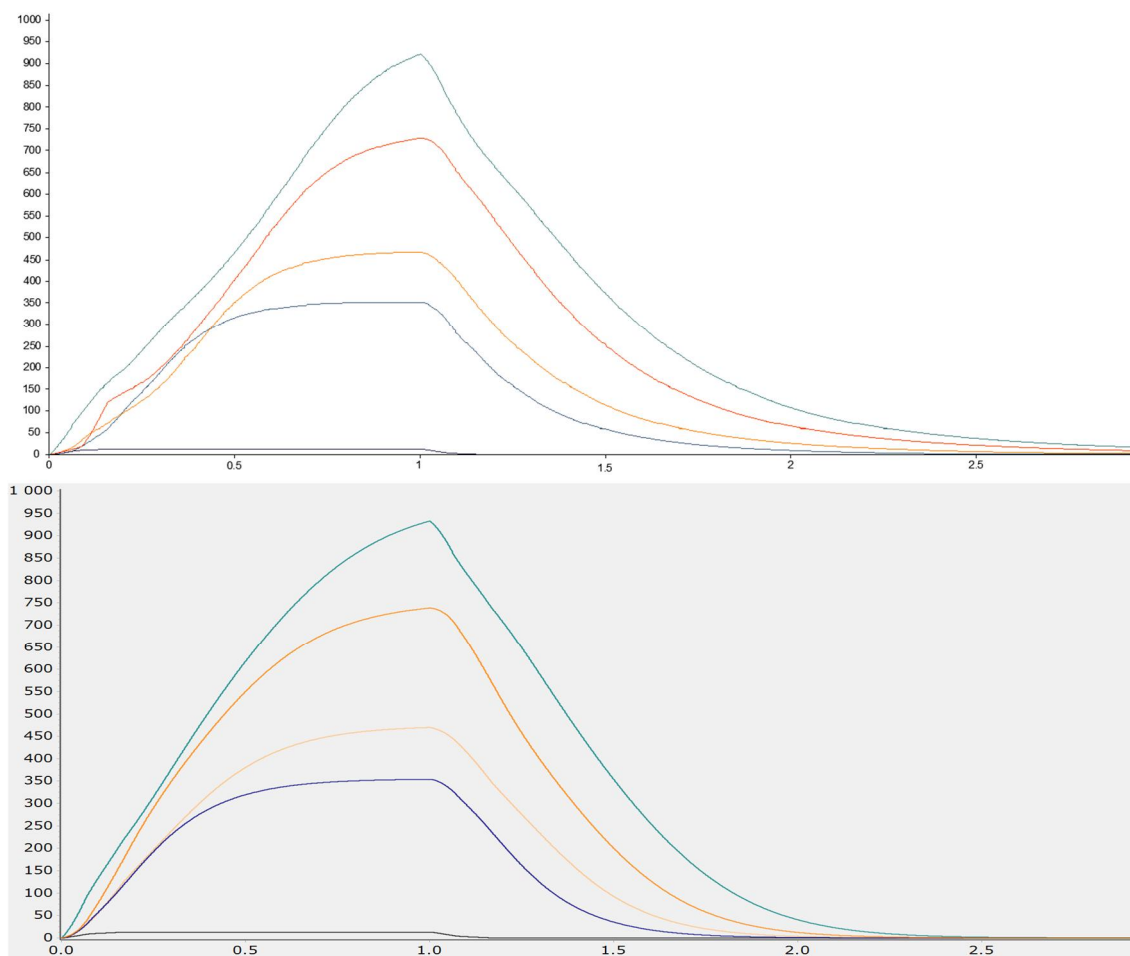
Taulukko 40. *Hulevesivirtaaman (l/s) muodostuminen nykytilanteessa valuma-alueittain. Mitoitussateen toistuvuus on 1/5a ja kesto 60 min. Sateen intensiteetti on 53 l/s*ha, kasvihuoneilmiön myötä 64 l/s*ha.*

Alue	Pinta-ala [ha]	Valuma- kerroin	Käsinlaskenta		Ohjelma A		Ohjelma B	
			Q	Q _{kertymä}	Q	Q _{kertymä}	Q	Q _{kertymä}
1	19,9	0,10	105	105	105	105	105	105
1k			130	130	125	125	125	125
2	7,7	0,10	45	150	40	145	40	145
2k			55	180	50	175	50	175
3	12,9	0,10	70	220	70	215	70	210
3k			85	265	80	255	80	250
4	7,0	0,17	65	280	65	275	65	260
4k			75	340	75	330	75	310
5	0,8	0,10	5	5	5	5	5	5
5k			5	5	5	5	5	5

Taulukko 41. *Hulevesivirtaaman (l/s) muodostuminen kaavoitustilanteessa. Mitoitus-sateen toistuvuus on 1/5a ja kesto 60 min. Sateen intensiteetti on 53 l/s*ha, kasvihuoneilmiön myötä 64 l/s*ha.*

Alue	Pinta-ala [ha]	Valuma- kerroin	Käsinlaskenta		Ohjelma A		Ohjelma B	
			Q _{alue}	Q _{kertymä}	Q _{alue}	Q _{kertymä}	Q _{alue}	Q _{kertymä}
1	19,9	0,33	350	350	355	355	355	355
1k			425	425	420	420	420	420
2	7,7	0,29	120	470	105	465	120	470
2k			140	565	130	555	140	560
3	12,9	0,39	265	735	270	730	275	740
3k			320	890	315	870	330	880
4	7,0	0,59	220	955	250	920	220	840
4k			265	1155	295	1110	260	1120
5	0,8	0,30	10	10	15	15	10	10
5k			15	15	15	15	15	15

Molemmilla laskentaohjelmilla tulokset olivat samaa suuruusluokkaa kuin laskemalla käsin. Erot olivat vain 5...10 l/s luokkaa. Viimeisellä eli neljännellä valuma-alueella hulevesivirtaamiin alkoi muodostua pieniä eroja eri laskentatavoilla. Valuma-alueilta purkautuva kertymävirtaama on esitetty kuvassa 57 molemmilla mallinnusohjelmilla.



Kuva 57. Valuma-alueilta purkautuva virtaama, kun kaavan vaikutus on huomioitu, mitoitussateen intensiteetti on 53 l/s*ha ja sateen kesto on 60 minuuttia. Ohjelma A:n hydrografi (ylhäällä) ja ohjelma B (alhaalla). Molemmissa kuvissa valuma-alueiden järjestys on alhaalta ylöspäin 5, 1, 2, 3 ja 4.

Kuvasta 57 voi havaita, että vaikka huippuvirtaamat ovat lähes samansuuruisia, purkuvirtaaman muodossa alkaa erottua eroja: ohjelmassa B kaikkien valuma-alueiden virtaama on päättynyt ennen 2,5 tuntia, mutta ohjelmassa A virtaamaa on 2,5 tunnin kuluessa vielä vähän jäljellä valuma-alueilla 3 ja 4.

7.3.2 Viivytyrakenteet

Osavaluma-alueelta purkautuva virtaama pyritään pitämään nykyisellä tasolla. Osavaluma-alueen purkuvirtaaman tavoitteeksi valittiin vastaavalla sateen intensiteetillä muodostunut virtaama nykytilanteessa.

Viivytyrakenteiden pinta-ala valittiin käsinlaskennan perusteella niin, että vesikerroksen paksuus on 1m. Syvämpi rakenne mahdollistaa rakenteesta purkautuvan virtaaman säätämisen purkuaukon halkaisijalla. Taulukkoon 42 on koottu mallinnuksen tuloksia: tulovirtaama rakenteeseen, purkuaukon halkaisija ja vesikerroksen paksuus viivytyrakenteessa.

Taulukko 42. Viivytystilavuuden vertailu osavaluma-alueilla 1-4. Vertailu on tehty 53 l/s*ha sateella, jonka kesto on 60 min. Viivytyrakenteen pinta-ala on sama kaikissa tarkastelutilanteissa. Purkuaukon kokoa säätämällä rakenteen purkuvirtaama on pyritty saamaan mahdollisimman lähelle luonnontilaisen alueen purkuvirtaamaa. Taulukossa K=käsinlaskenta, A=ohjelma A ja B on ohjelma B.

Alue	Ala [m ²]	Q _{purku} [l/s]	Q _{tulo} [l/s]			Vesikerroksen paksuus [m]			d _{purkuaukko} [mm]	
			K	A	B	K	A	B	A	B
1	890	105	350	355	355	1,0	0,76	1,05	260	230
1k	1070	130	425	425	420	1,0	0,78	1,03	290	260
2	260	150	225	190	190	1,0	0,55	0,76	370	300
2k	315	180	270	230	230	1,0	0,60	0,79	400	330
3	710	220	410	365	385	1,0	0,71	0,97	410	340
3k	855	265	500	430	460	1,0	0,73	0,95	450	380
4	565	280	440	410	400	1,0	0,65	0,91	450	400
4k	685	340	535	490	480	1,0	0,96	0,87	500	450

Molemmilla ohjelmilla päästiin lähelle tavoitepurkuvirtaamaa, erot olivat noin ± 5 l/s.

Ohjelmalla B purkuvirtaamaan päästiin pienemmällä purkuaukon halkaisijalla. Suurimmin halkaisijoiden välinen ero oli 70 mm. Ohjelmalla B tulovirtaama oli lähes sama kuin käsinlaskemalla ja vesikerroksen paksuus oli lähellä 1 metriä. Vedenpinan korkeus vaihteli -0,25...0,05 metriä käsin laskettuun verrattuna, mikä vastaa keskimäärin 30 m³ eroa viivytystarpeessa.

Ohjelmalla A vesikerroksen paksuus oli keskimäärin 0,7 m, eli viivytystarve oli noin 30 % pienempi käsin laskettuihin tilavuuksiin verrattuna. Tilavuustarpeena tämä vastaa keskimäärin 170 m³ pienempää viivytyismäärää.

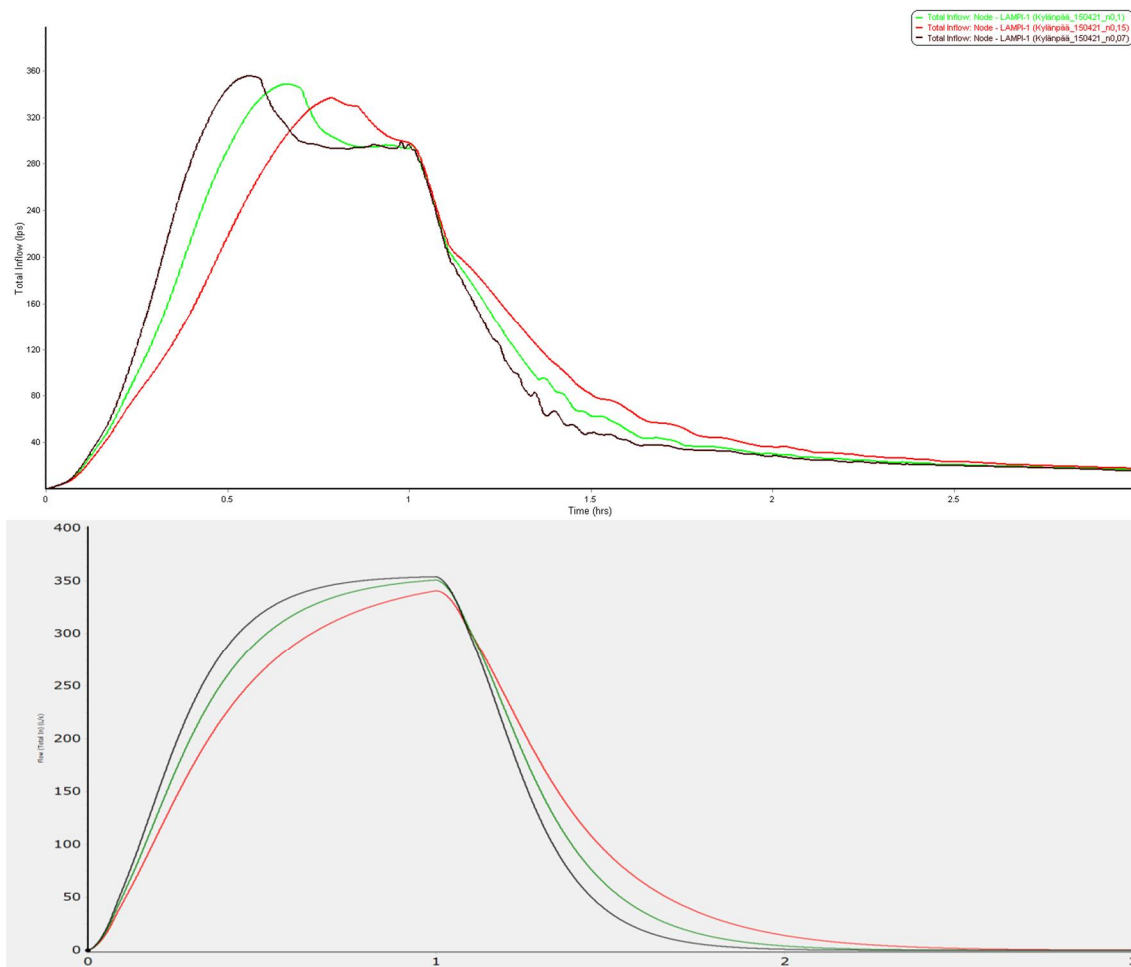
7.3.3 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelu toteutettiin muuttamalla uomavirtauksen karkeuskerrointa 0,07 (ruoholuiska). Uoman karkeutena kokeiltiin Manningin arvoja 0,1 (epätasainen ruoholuiska/luonnontilainen puro) ja 0,15 (luonnonuoma, paljon kasvillisuutta). Vertailu toteutettiin 60 minuutin sadetapahtumalle, kun sateen intensiteetti on 53 l/s*ha.

Karkeuskerroin vaikuttaa uoman virtausnopeuden kautta huippuvirtaaman muodostumiseen. Karkeuskertoimen vaikutus viivytyrakenteiden huipputulovirtaamiin on koottu taulukkoon 43. Vaikutukset viivytyrakenteen 1 tulovirtaamiin on esitetty myös graafisesti kuvassa 58.

Taulukko 43. Herkkyystarkastelu: uoman karkeuskertoimen vaikutus viivytysrakenteen tulovirtaamaan. Vertailu on tehty 60 minuutin sateelle, kun sateen intensiteetti on 53 l/s*ha.

Osavaluma-alue	A			B		
	n=0,07	n=0,1	n=0,15	n=0,07	n=0,1	n=0,15
1	355	348	337	354	351	341
2	189	180	165	189	183	174
3	362	349	327	384	373	353
4	410	378	343	399	383	359



Kuva 58. Herkkyystarkastelun vaikutus viivytysrakenteen 1 tulovirtaamaan: ohjelma A:n hydrografi (ylhäällä) ja ohjelma B:n (alhaalla). Kuvaajissa Manningin kerroin on 0,07 (musta), 0,1 (vihreä) ja 0,15 (punainen).

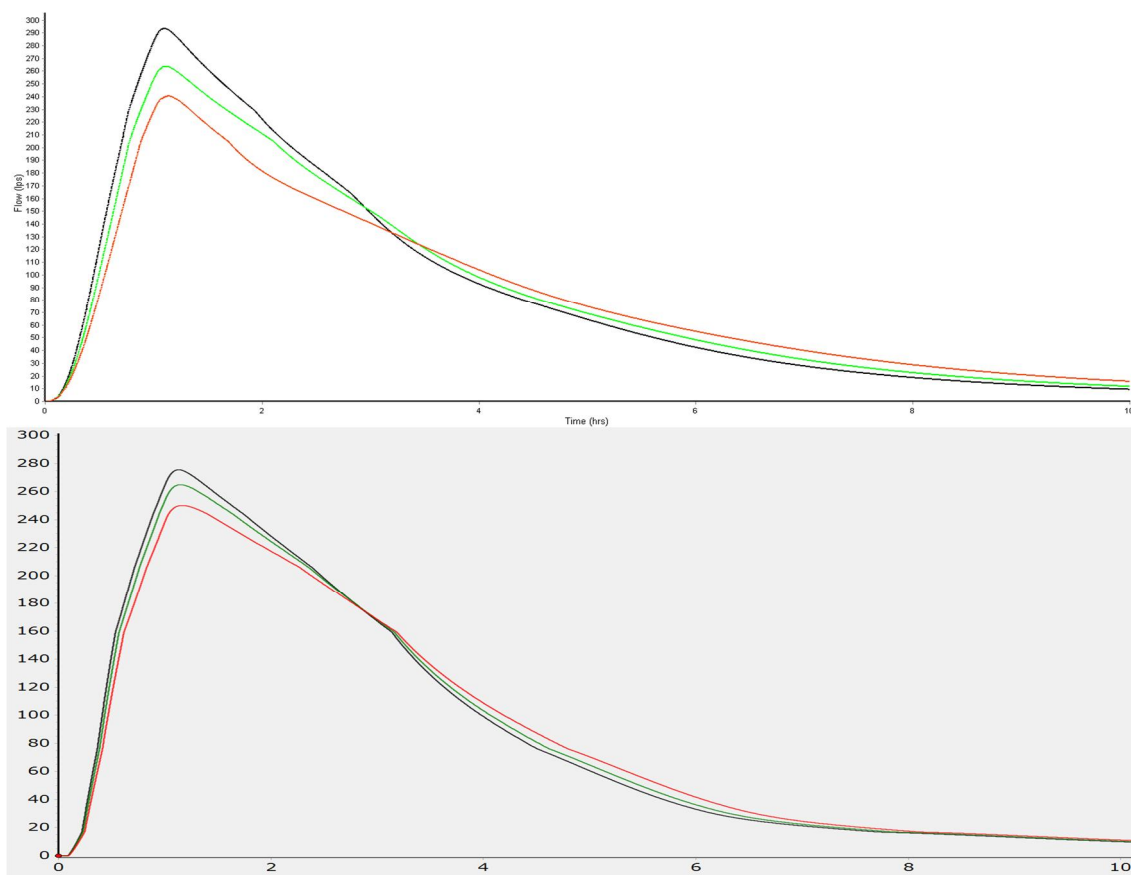
Uoman karkeuskertoimella on virtausnopeuden kautta vaikutus hydrografin muotoon ja huippuvirtaamaan. Vaikutus on suurin valuma-alueelle 4, koska virtausmatka alueen 1 kaukaisimmasta pisteestä valuma-alueen 4 purkupisteeseen on suurin. Karkeuskertoimen kaksinkertaistaminen pienentää huippuvirtaamaa ohjelmassa A noin 15 %, ohjelmassa B vaikutus on hieman pienempi, noin 10 %. Ohjelmien väliset erot ovat alle 5 %. Ohjelmalla A saatiin pienempiä virtaamia suuremmilla karkeuskertoimilla (n= 0,1 ja n=0,15).

Karkeuskertoimen vaikutus viivytysrakenteen vedenpinnankorkeuteen on esitetty taulukossa 44.

Taulukko 44. Herkkyystarkastelu: uoman karkeuskertoimen vaikutus vedenpinnankorkeuteen viivytysrakenteessa. Vertailu on tehty 60 minuutin sateelle, kun sateen intensiteetti on 53 l/s*ha.

Osavalmu-alue	A			B		
	n=0,07	n=0,1	n=0,15	n=0,07	n=0,1	n=0,15
1	0,76	0,75	0,73	1,05	1,02	0,98
2	0,55	0,56	0,56	0,76	0,73	0,68
3	0,70	0,69	0,67	0,97	0,93	0,87
4	0,65	0,60	0,53	0,91	0,86	0,79

Karkeuskerroin vaikuttaa enemmän viivytysrakenteen vedenpinnankorkeuteen ohjelmassa B kuin ohjelmassa A. Suurimmillaan vaikutus on reilu kymmenen prosenttia. Molemmilla ohjelmilla vaikutus kasvaa virtausmatkan kasvaessa. Ohjelmassa B vaikutus on kaikissa viivytysrakenteissa noin 10 cm. Ohjelmassa A vaikutukset ovat muutamia senttejä kolmella ensimmäisellä rakenteella, mutta neljännellä viivytysrakenteella ero on noin 10 cm. Vaikutus alueelta purkautuvaan virtaamaan muotoon on esitetty kuvassa 59.



Kuva 59. Purkuvirtaaman muutos ajan suhteen, kun Manningin kerroin on 0,07 (musta), 0,1 (vihreä) ja 0,15 (punainen). Ohjelma A (ylhäällä) ja ohjelma B (alhaalla).

Purkuvirtaaman muoto molemmilla ohjelmilla on hyvin samankaltainen. Ohjelma B:ssä huippuvirtaamat ovat 280...240 l/s ja ohjelmassa A 290...240 l/s.

7.3.4 Viivytystarve EIA-menetelmällä

Menetelmässä käytetty 16 mm mitoitussade on 70...85 % mitoituksessa käytettyjä sade-tilanteita 19,2 mm ja 22,8 mm pienempi. Sademäärän vaikutus valuma-alueelle satavaan vesimäärään (m^3) on esitetty taulukossa 45.

Taulukko 45. Osavaluma-alueille satava vesimäärä $50 m^3$ tarkkuudella 16mm, 19,2 mm ja 22,8 sademäärillä.

Valuma-alue	Sademäärä	Alue 1	Alue 2	Alue 3	Alue 4	Alue 5
EIA	16 mm	3200	1250	2050	1100	150
Nykytilanne	19,2 mm	3800	1500	2500	1350	150
Kasvihuoneilmiö	22,8 mm	4550	1750	2950	1600	200

Pienemmän sademäärän lisäksi valumakertoimien pienentäminen vaikuttaa muodostuviin hulevesimääriin ja sitä kautta viivytys- ja käsittelyrakenteiden tilatarpeeseen. Taulukossa 46 on viivytystarve käsinlaskettuna ja taulukossa 47 ohjelmalla A laskettuna.

Taulukko 46. Viivytystarve (m^3) ja viivytystarpeen muutos käsin laskettuna. Taulukossa k = kertoimen vaikutus, $k+p$ =kertoimen vaikutus+puistoalueiden hulevesikerroin on 0.

Tarkastelutilanne	Sademäärä	Alue 1	Alue 2	Alue 3	Alue 4	Alue 5
Nykytilanne	19,2 mm	890	260	710	565	30
Kasvihuoneilmiö	22,8 mm	1070	315	855	685	40
EIA (k)	16 mm	725	220	590	490	25
EIA (k+p)	16 mm	635	195	535	465	20

EIA-laskentamenetelmällä viivytystilavuustarve on 15...30 % pienempi jos valumaker-toimen muutos lasketaan suoraan TIA:n ja EIA:n välisellä muuntokaavalla. Jos puisto-jen valumakerroin oletetaan nolllaksi, eroa muodostuu 20...40 % nykymitoituukseen ver-rattuna.

Ohjelmalla A laskettiin vesikerroksen paksuus viivytysrakenteissa taulukon 42 mukai-sen nykytilanteen (19,2 mm) viivytysrakenteiden pinta-aloilla ja purkurakenteilla. Ve-simäärä tarkasteltiin 16 mm, 19,2 mm ja 22,8 mm sateella. Vesimäärä rakenteessa las-kettiin myös käyttämällä EIA-laskentamenetelmän mukaista 16 mm mitoitussadetta ja muunnettua hulevesikerrointa. Mitoitussade (16 mm) syötettiin malliin sekä 30 minu-u-tin että 60 minuutin kestoisena.

Taulukko 47. Vesikerroksen paksuus (m) viivytysrakenteessa eri sadetilanteissa. Taulukossa k = kertoimen vaikutus, $k+p$ =kertoimen vaikutus+puistoalueiden hulevesikerroin on 0.

Tarkastelutilanne	Sademäärä	Alue 1 V=890 m ³	Alue 2 V=260 m ³	Alue 3 V=710 m ³	Alue 4 V=565 m ³
Kasvihuoneilmiö*	22,8 mm	0,89	0,64	0,81	0,76
Nykytilanne*	19,2 mm	0,76	0,55	0,70	0,65
EIA*	16 mm	0,63	0,48	0,61	0,54
EIA (k)*	16 mm	0,44	0,39	0,47	0,44
EIA (k+p)*	16 mm	0,39	0,36	0,42	0,41
EIA (k)**	16 mm	0,47	0,42	0,49	0,47
EIA (k+p)**	16 mm	0,42	0,37	0,44	0,45

*Sateen kesto 1h **Sateen kesto 30 min

Mallintamalla saatu tarve viivytykselle on huomattavasti pienempi kuin käsinlaskettu viivytystarve. Vaikka kasvihuoneilmiön vaikutus kasvattaa sademääriä lähes 20 %, muodostuvat hulevedet mahtuvat nykytilanteen mukaan mitoitettuun rakenteeseen. Kasvihuoneilmiön mukaisella mitoitussateella viivytystilavuutta voitaisiin pienentää 10...35 % ja nykytilanteen mukaisella mitoituksella 25...45 %. Mitoitussateen pienentäminen EIA-menettelyn mukaiseksi (16 mm) vähentää viivytystarpeen lähes puoleen nykyisestä. Muutokset hulevesikertoimissa ja puistojen huomioimisessa pienentävät viivytystarpeen 55...60 % nykyisestä.

7.4 Mallinnustilanteen 2 tulokset (Rajamäki)

Rajanpään verkoston kapasiteetti- ja viivytystarkastelua varten luotiin uutta mallinnustilannetta vastaava malli. Mallinnustulosten vertailun vuoksi verkoston ja viivytysrakenteen ominaisuudet pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman samankaltaisina (vakio-pinta-ala, purkuvirtaama, häviöt).

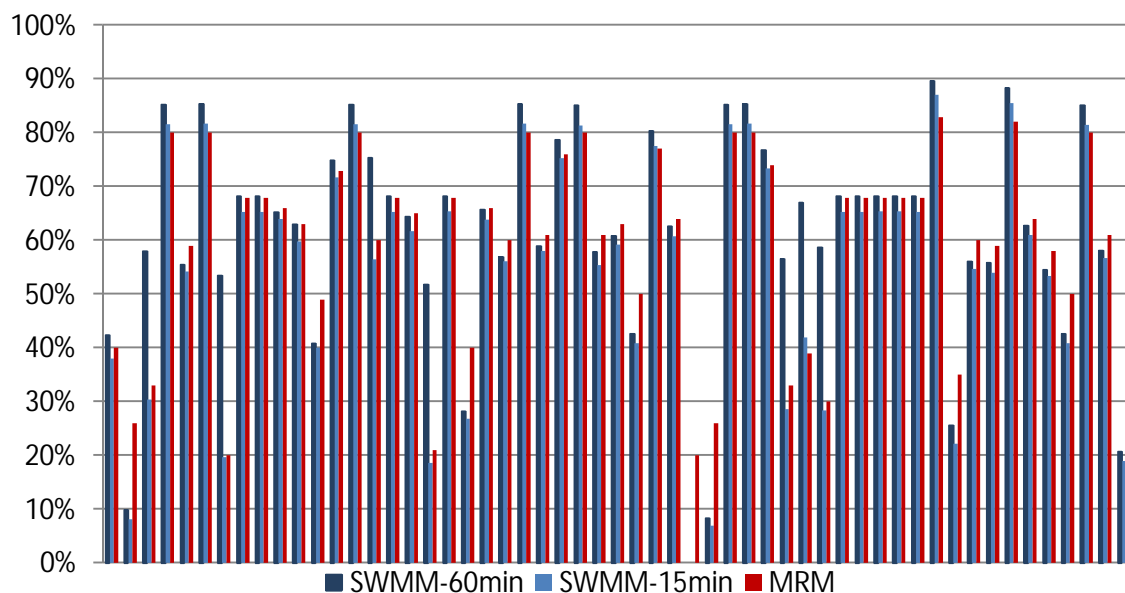
Mallinnustulokset on esitetty luvuissa 7.4.1-7.4.6. Tehokkaan sadannan osuus ja valuma-alueelta muodostuvat hulevesivirtaamat on esitetty kahdessa ensimmäisessä luvussa. Verkoston kapasiteetti on esitetty luvussa 7.4.3 ja viivytysrakenteen mitoituserot luvussa 7.4.4. Lopuksi on esitetty herkkyytstarkastelu ja viivytystarve EIA-laskentamenetelmällä.

7.4.1 Tehokas sadanta

Vertailussa on mukana kaksi sadetapahtumaa. Verkoston mitoitus on tehty 15 minuutin sateella (sademäärä 10,8 mm) ja viivytystilavuus 60 minuutin sateella (sademäärä 19,2 mm). Sademäärien ero on 8,4 mm.

Rationaalisessa menetelmässä muodostuva hulevesimäärä lasketaan samalla kertoimella sateen kestosta ja intensiteetistä riippumatta. SWMM-menetelmässä valunnan osuuden

kasvuun vaikuttavat läpäisevän pinnan osuus ja maaperälle annetut imeyntäominaisuudet, koska molempien sadetapahtumien sademäärä on painannesäilyntää suurempi. Valuman osuus sadannasta on esitetty kuvassa 60. Yhteenveto tarkastelualueen hulevesien muodostumisesta on koottu taulukkoon 48.



Kuva 60. Tehokkaan sateen osuus prosentteina 15 ja 60 minuutin mitoitussateilla.

Taulukko 48. Valuntamenetelmän vaikutus hulevesien muodostumiseen Rajamäen alueella. Taulukossa MRM on modifioitu rationaalinen menetelmä.

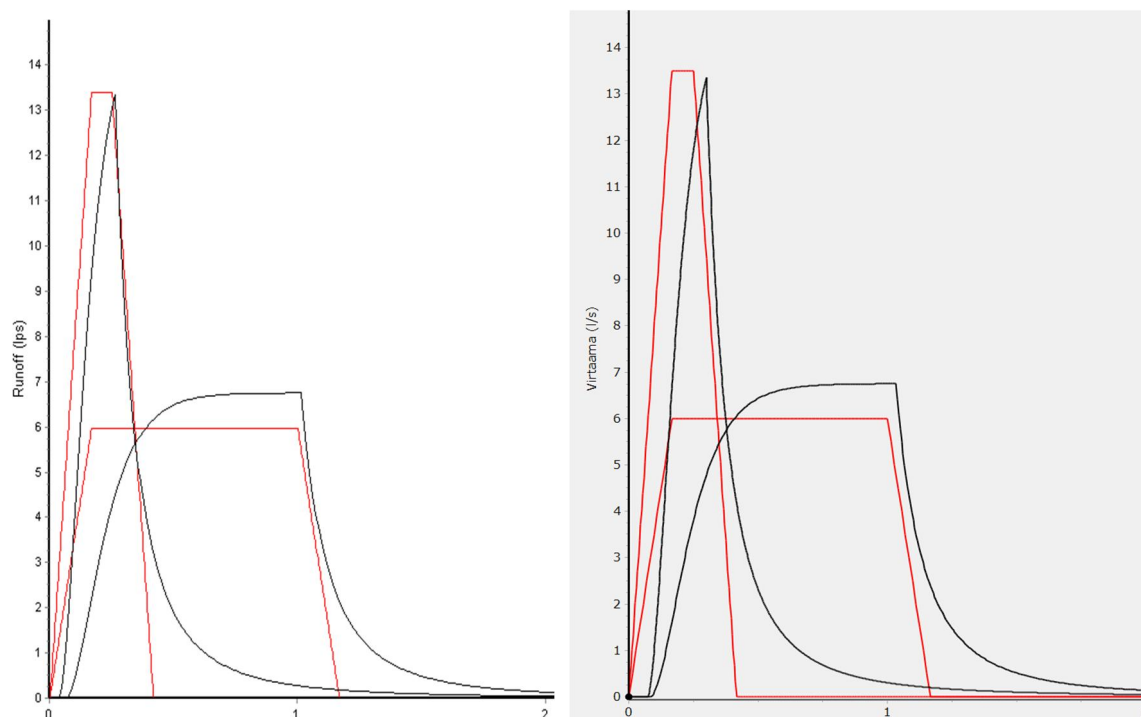
Parametri	Yksikkö	15 minuutin sade		60 minuutin sade	
		SWMM	MRM	SWMM	MRM
Tehokas sadanta	mm	5,0	5,5	10,4	9,7
Tehokas sadanta	%	46	51	54	51
Hulevesimäärä	m ³	1032	1137	2164	2022

Hulevettä muodostuu lyhyellä 15 minuutin sateella vähemmän SWMM-menetelmällä kuin MRM-menetelmällä. Pidemmällä tunnin sateella tilanne kääntyy toisinpäin. Rationaalisessa menetelmässä tehokkaan sateen osuus osavaluma-alueilla vaihtelee 20-85 % välillä. SWMM-menetelmässä tehokasta sadetta on 0-90 % sademäärästä. Koko valuma-alueen pinta-alan suhteutettuna tehokkaan sadannan osuus on rationaalisella menetelmällä sateen kestosta riippumatta 50 % sademäärästä. SWMM-menetelmän 15 minuutin sateella päästään 45 % osuuteen, 60 minuutin sateella noin 55 %:iin.

Lyhyellä sadetapahtumalla SWMM-menetelmällä muodostuu 0,5 mm vähemmän hulevettä osavaluma-alueiden vaihteluvälin ollessa -2,2...+0,5 mm. Pidemmällä 60 minuutin sateella SWMM-menetelmällä muodostuu 0,7 mm enemmän valuntaa vaihteluvälin ollessa -3,8...+6,4 mm. Erot ovat suurimpia lounaisosan valuma-alueilla, joissa on paljon läpäisevää pintaa ja maaperä on savea. Näillä alueilla tehokkaan sateen osuus on SWMM-menetelmällä noin 6 mm rationaalista menetelmää suurempi. Myös pohjoisosan pohjavesialueilla suuri imeytyvyys aiheuttaa eroja valumamääriin.

7.4.2 Valuma-alueilta purkautuva huippuvirtaama

Molemmat ohjelmat muodostavat valuma-alueelta purkautuvasta virtaamasta virtaamakäyrän, joka on hydraulisen laskennan lähtötieto. Yhdeltä valuma-alueelta (valuma-alue nro 15) purkautuva hulevesivirtaama 15 ja 60 minuutin mitoitusasteilla on esitetty kuvassa 61.



Kuva 61. Valuma-alueelta 15 purkautuva hulevesivirtaama 15 minuutin ja 60 minuutin mitoitusasteilla. Kuvassa modifioidun rationaalisen menetelmän virtaamakäyrä punaisella, SWMM-menetelmän mustalla. Virtaamakäyrä ohjelmasta A (vasemmalla) ja B (oikealla).

Osavaluma-alueelta 15 purkautuvan huippuvirtaaman suuruus on 15 minuutin sateella noin 13,5 l/s. Pidemmällä 60 minuutin mitoitusasteella huippuvirtaamissa on noin 6 l/s. Menetelmäkohtainen ero on alle 1 l/s: SWMM-menetelmällä huippuvirtaama on 6,8 l/s ja modifioidun rationaalisen menetelmän 6,0 l/s. Osavaluma-alueilta purkautuvien huippuvirtaamien eroja on koottu taulukkoon 49.

Taulukko 49. Valuma-alueilta purkautuva huippuvirtaama.

Parametri	Yksikkö	15 minuutin sade		60 minuutin sade	
		SWMM	MRM	SWMM	MRM
Huippuvirtaamien vaihteluväli	l/s	0...91	2...96	0...42	1...43
Huippuvirtaamien keskiarvo	l/s	21	23	11	10
Osavaluma-alueita, joilla SWMM>MRM	kpl	29		39	
Menetelmien virtaamaero < 1 l/s	kpl	42		42	
Menetelmien virtaamaero < 2 l/s	kpl	50		46	
Menetelmien virtaamaero < 5 l/s	kpl	53		48	
Menetelmien välinen ero (max)	l/s	8		15	

Osavaluma-alueita on 55 kappaletta. Huippuvirtaama on SWMM-menetelmällä modifioitua rationaalista menetelmää suurempi 50 % osavaluma-alueista 15 minuutin sateella ja 70 %:lla tunnin sateella. Menetelmien välinen huippuvirtaamien ero on noin 75 %:lla osavaluma-alueista alle 1 l/s. Osavaluma-alueita, joilla menetelmien välinen ero kasvaa yli 5 l/s on 2...7 mitoitusasteen kestoista riippuen. Huippuvirtaamaerot ovat yleensä suurimpia valuma-alueilla, joilla tehokkaan sateen väliset erot olivat suuret.

7.4.3 Virtaamat verkostossa

Hydraulista laskentaa varten eri laskentamenetelmille jouduttiin tekemään muutoksia: ohjelma A:n kinemaattista ja ohjelma B:n käyttämään Convex-laskentamenetelmiä varten kaksi kaivoa muutettiin virtauksenjakokaivoiksi, koska kaivoista oli kaksi purkuputkea. Kinemaattista laskentaa varten linjaosuudet joilla kaltevuus oli negatiivinen, jouduttiin muuttamaan positiivisiksi. Muutokset vaikuttivat virtaamien johtamissuuntiin verkostoissa.

Verkoston toimintakyky 15 minuutin 120 l/s*ha sateella (toistuvuus 1/2a, kasvihuoneilmiön vaikutus) on esitetty taulukossa 50 ja 60 minuutin 53 l/s*ha sateella (toistuvuus 1/5a) on esitetty taulukossa 51.

Taulukko 50. Verkoston toimintakyky joka toinen vuosi toistuvalla 15 minuutin sateella (kasvihuoneilmiö huomioitu) eri laskentamenetelmillä. Taulukossa dyn=dynaaminen, kin=kinemaattinen ja con=convex-menetelmä.

Parametri	Yksikkö	Ohjelma A				Ohjelma B	
		SWMM dyn	SWMM kin	MRM dyn	MRM kin	SWMM con	MRM con
Täysi putki	kpl	34	10	46	9	61	66
$Q_{huippu} \geq Q_{suunniteltu}$	kpl	10	10	11	9	36	38
Tulviva kaivo	kpl	0	8	0	6	13	17
Tulviva vesi yht.	ha-mm	0	72	0	45	*	*

*laskentamenetelmä ei määritä tulvivaa vesimäärää

Taulukko 51. Verkoston toimintakyky viiden vuoden välein toistuvalla 60 minuutin sateella eri laskentamenetelmillä. Taulukossa dyn=dynaaminen, kin=kinemaattinen ja con=convex-menetelmä.

Parametri	Yksikkö	Ohjelma A				Ohjelma B	
		SWMM dyn	SWMM kin	MRM dyn	MRM kin	SWMM con	MRM con
Täysi putki	kpl	17	6	17	7	34	43
$Q_{huippu} \geq Q_{suunniteltu}$	kpl	8	6	9	7	23	19
Tulviva kaivo	kpl	0	5	0	4	3	2
Tulviva vesi yht.	ha-mm	0	158	0	89	*	*

*laskentamenetelmä ei määritä tulvivaa vesimäärää

Mallinnettu verkosto koostuu 90 putkesta ja 91 kaivosta. Käytettäessä dynaamista laskentamenetelmää verkoston välityskyky riittää mitoitussateen johtamiseen. Vesi padotuu kaivoihin, mutta ei tulvi kaivoista. Padottumista aiheuttaa kaivojen nielu- ja purkuhäviöt. Virtaama putkissa ylittää täyden putken virtaaman 10 %:sta linjoissa.

Kinemaattisella laskentamenetelmällä virtaama putkissa ylittää täyden putken kapasiteetin yhtä monella osuudella kuin dynaamisessa menetelmässä. Verkosto kuitenkin tulvii 5...8 kaivon kohdalla. Laskentamenetelmän mukaisesti kaivo tulvii heti kun virtaama ylittää linjaosuuden laskennallisen kapasiteetin. Tulviva vesimäärästä peittää 0,4...1,6 ha alueen, jos vesipatsaan paksuus on 10 cm.

Convex-laskentamenetelmällä verkosto on selkeästi muita laskentamenetelmiä täydempi. Lyhyellä 15 minuutin sateella verkostosta noin 65 % on täynnä ja lähes 40 %:lla linjaosuuksista virtaama on laskennallista kapasiteettia suurempi. Kaivoista yli 15 % tulvii. Tunnin mittaisella sateella verkostosta 40...45 % on täynnä, mutta tulvivia kaivoja on enää muutama. Verkostossa virtaama on laskennallista putkikapasiteettia suurempi 20 %:lla linjaosuuksista. Convex-laskentamenetelmä ei määritä tulvivaa vesimäärää.

Tasaisen sateen lisäksi verkoston johtamiskapasiteettia tarkasteltiin muuttuvalla 20 minuutin CDS-sateella. Tarkastelu tehtiin ainoastaan dynaamisella laskentamenetelmällä (Ohjelma A), joka toinen ja kolmas vuosi toistuvilla sateilla. Tulokset on esitetty taulukossa 52.

Taulukko 52. Verkoston toimintakyky 20 minuutin SDS sateella 1/2a...1/3a toistuvuuksilla. Laskenta on suoritettu ohjelman A SWMM:n dynaamisella laskentamenetelmällä. Taulukossa k tarkoittaa kasvihuoneilmiön vaikutusta.

Parametri	Yksikkö	1/2a	1/2a+k	1/3a	1/3a+k
Täysi putki	kpl	29	45	39	65
$Q_{huippu} > Q_{suunniteltu}$	kpl	10	22	19	34
Tulviva kaivo	kpl	0	6	3	18
Tulviva vesi yht.	ha-mm	0	0,3	0,1	2,7

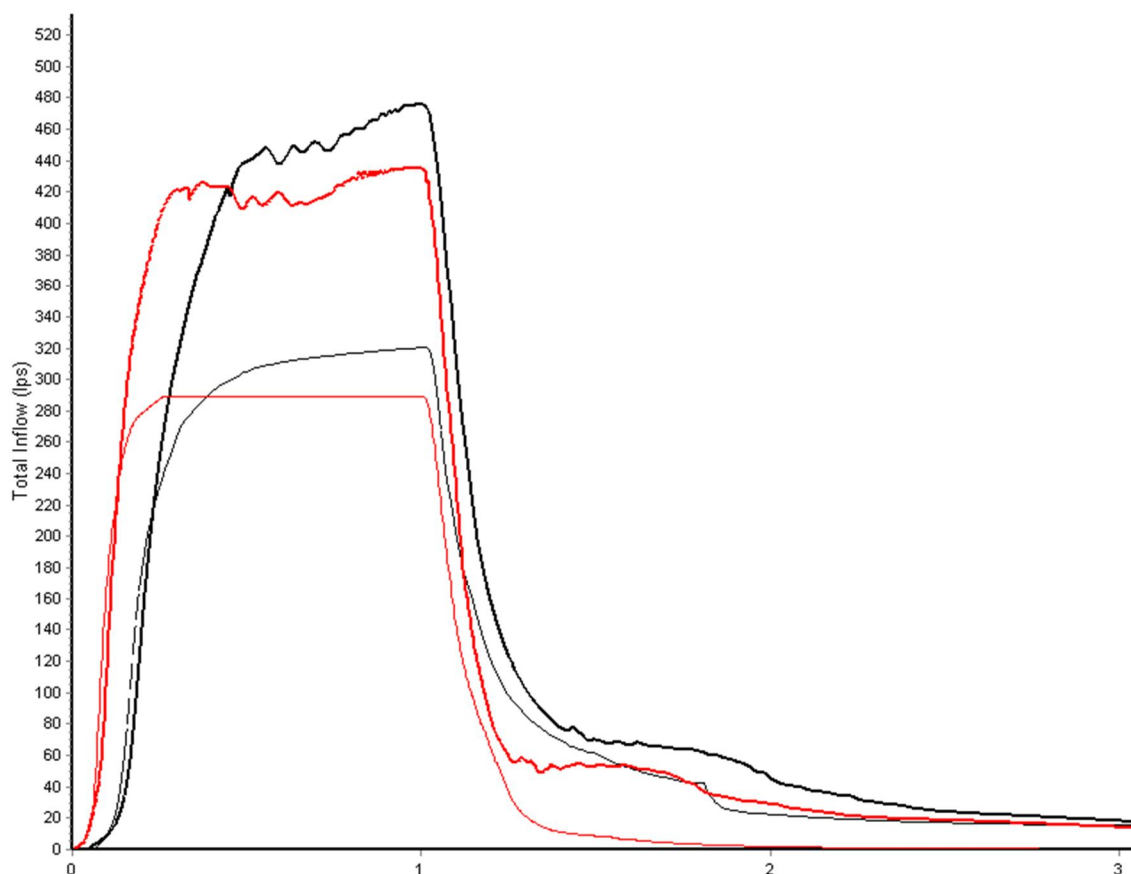
Verkoston kapasiteetti mahdollistaa CDS-sateen johtamisen ilman tulvimista joka toinen vuosi toistuvalla sateella. Kasvihuoneilmiön vaikutus tai toistuvuuden kasvattaminen joka kolmanteen vuoteen aiheuttaa muutaman kaivon tulvimisen. Tulvivan veden määrä 10 cm vesipatsaana peittää noin 10-30 m² alueen.

Kasvihuoneilmiön huomiointi 1/3a toistuvalla CDS-sateella aiheuttaa verkoston kapasiteetin ylittymisen noin 30 % linjaosuuksilla. Kaivoista noin 20 % tulvii. Tulviva vesimäärä levittäytyy noin 300 m² alueelle 10 cm vesipatsaana.

7.4.4 Viivytyksrakenne

Rajamäen koulun eteläpuolelle on mallinnettu hulevesien viivytystarvetta. Viivytyksrakenteen purkurakenne on sisähalkaisijaltaan 400 mm putki. Rakenteen jälkeen hulevedet virtaavat noin 100 m avo-ojassa, jonka jälkeen hulevedet ohjataan 400M...500B hulevesilinjaan.

Hydraulinen laskentamenetelmä ei vaikuta valuma-alueelta muodostuvaan hulevesivirtaamaan tai huippuvirtaaman suuruuteen vaan virtaaman etenemiseen ja varastoitumiseen verkostossa. Laskentamenetelmän vaikutus viivytyksrakenteen tulovirtaamaan on esitetty kuvassa 62. Suurempi tulovirtaama (kuvassa paksumpi viiva) on laskettu dynaamisella laskentatavalla. Kinemaattisen tulovirtaaman (kuvassa ohuempi viiva) on huomattavasti pienempi verkoston ylivuotojen vuoksi.



Kuva 62. Kinemaattisen ja dynaamisen laskennan ero viivytyksrakenteen tulovirtaamassa 60 min sateella (toistuvuus 1/5a). Kuvassa MRM-menetelmä on esitetty punaisella ja SWMM-menetelmä mustalla. Dynaamisen laskennan tulos on paksummalla viivalla ja kinemaattisen ohuemmallalla.

Kuvassa 62 dynaaminen ja kinemaattinen laskenta on toteutettu samoilla stabiiliuteen vaikuttavilla ominaisuuksilla. Käyrien muodosta (tasaisempi viiva) voi selkeästi havaita, että kinemaattinen laskentamenetelmä on dynaamista stabiilimpi. Laskennassa koko

alueen laskennan jatkuvuudessa oli virhettä molemmilla laskentamenetelmillä alle 1 %. Dynaamisen laskennan stabiiliutta voi parantaa esimerkiksi pidentämällä aika-askelta.

Viivytysrakenteen koko on määritetty viidessä eri sadetilanteessa dynaamisella laskentamenetelmällä (ohjelma A) ja Convex-menetelmällä (ohjelma B). Viivytysrakenteen tilavuus ja vesikerroksen paksuus on laskettu 700 m² viivytysrakenteen pinta-alalle. Convex-menetelmällä laskenta on suoritettu ilman kaivojen nielu- ja purkuhäviöitä verkoston ylivuotojen vähentämiseksi. Tulokset on koottu taulukkoon 53.

Taulukko 53. Vesikerroksen paksuus (m) ja tilavuus (m³) pinta-alaltaan 700 m² viivytysrakenteessa. Mitoitussateen kesto on 60min, sateen intensiteetti vaihtelee. Taulukossa dyn=dynaaminen (ohjelma A) ja con=convex-menetelmä (ohjelma B).

Toistuvuus	Sade mm/min	SWMM dyn		MRM dyn		SWMM con*		MRM con*	
		h[m]	V[m ³]	h[m]	V[m ³]	h[m]	V[m ³]	h[m]	V[m ³]
1/1a	0,20	0,63	440	0,70	490	0,72	505	0,78	550
1/1a+kasvih	0,24	0,77	540	0,83	580	0,90	630	0,99	695
1/2a	0,25	0,80	560	0,87	610	0,95	665	1,04	730
1/3a	0,28	0,90	630	0,98	685	1,10	770	1,19	835
1/2a+kasvih	0,30	0,98	690	1,05	735	1,20	840	1,29	905
1/5a	0,32	1,06	750	1,13	790	1,30	910	1,40	980

*laskettu ilman kaivojen nielu- ja purkuhäviöitä. Verkostossa on muutama ylivuoto.

Sateen toistuvuuden valinta vaikuttaa merkittävästi tarvittavaan viivytystilavuuteen. Joka vuosi toistuvalla sateella mitoitettu rakenne on noin 40 % pienempi kuin joka viides vuosi toistuvan sateen viivytysrakenne kaikilla laskentamenetelmillä.

SWMM-laskentamenetelmällä, dynaamisella laskennalla saatiin 5...10 % pienempi viivytystarve kuin Convex-menetelmällä. MRM-menetelmällä vastaava ero oli 15...20 %. Viivytystilavuutena hydraulinen laskentamenetelmä vaikuttaa viivytystarpeeseen 70...200 m³ verran. Vaikutus on pienempi usein toistuvilla sateilla.

Ohjelmakohtaisesti (eli samalla hydraulisella laskentamenetelmällä) molemmilla valun- tamenetelmien välinen ero on 5...10 %. SWMM-menetelmällä saadaan noin 50 m³ pienempi viivytystilavuus MRM-menetelmään verrattuna.

7.4.5 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelu toteutettiin dynaamiselle laskentamenetelmälle 15 ja 60 minuutin sateelle. SWMM-menetelmällä herkkyystarkastelu toteutettiin kolmen muuttujan suhteen: (i) imeyntää muutettiin kaikilla valuma-alueilla +50 mm/h alkuperäiseen verrattuna, (ii) kaivojen yksikköhäviöt jätettiin huomioimatta ja (iii) hydraulista leveyttä kasvatettiin 10 %. Sovelletulla rationaalisella menetelmällä herkkyystarkastelu tehtiin (i) kaivojen yksikköhäviöiden suhteen ja (ii) pienentämällä valunta-aikaa 10 %. Herkkyystar-

kastelun vaikutukset tarkasteltiin kaivojen huippuvedenpinnankorkeuden ja 700 m³ viivytyksrakenteen vedenpinnankorkeuden suhteen. Tulokset on koottu taulukkoon 54.

Taulukko 54. Herkkyystarkastelun vaikutukset viivytyksrakenteen (700 m³) vedenpinnankorkeuden ja kaivojen huippuvedenpinnankorkeuden keskimääräiseen muutoksen (cm) suhteen.

Tarkastelukohde	Sateen kesto	SWMM Viivytys h	SWMM Kaivo	MRM Viivytys	MRM Kaivo
Imeyntä +50 mm/h	60 min	-3 cm	-3 cm	-	-
	15 min		0 cm	-	-
Paikallishäviötä ei huomioida	60 min	0 cm	-4 cm	1,11	-5 cm
	15 min		-14 cm		-25 cm
Valunta-aika -10 %* tai hyd- raulinen leveys + 10 %**	60 min	+1 cm	0 cm	1,12	0 cm
	15 min		0 cm		+2 cm

*MRM ** SWMM

Valunta-ajan pienentäminen SWMM-menetelmällä tehtiin kasvattamalla hydraulista leveyttä 20 %:lla. 60 minuutin sateella valunta-aika pieneni noin 10 %.

Herkkyystarkastelun vaikutus viivytystilavuuteen on suurimmillaan 20 m³ eli noin 2 %. Tarkastelluilla muuttujilla oli enemmän vaikutuksia vedenpinnankorkeuksiin kaivoissa. Kaivojen paikallishäviöt vaikuttavat kaivojen vedenpinnankorkeuksiin varsinkin lyhyillä rankkasateilla: 15 minuutin sateella vedenpinnankorkeus laski 14...25 cm, 60 minuutin sateella noin 5 cm. Muissa tarkastelutapauksissa vaikutukset jäivät muutamiin sentteihin. Kaikissa tapauksissa vaikutuksia ei ollut edes havaittavissa.

7.4.6 Viivytystarve EIA-menetelmällä

EIA-menetelmän mukainen 16 mm sademäärä jaettiin eri kestoisiin sadetapahtumiin mallinnusta varten (taulukko 55). 16 mm sadetapahtumia vastaava intensiteetti ja sateen toistuvuus (ilman kasvihuoneilmiön vaikutusta) on koottu taulukkoon 55.

Taulukko 55. 16 mm sateen kestot, intensiteetit ja toistuvuudet hulevesioppaan (Kuntaliitto 2012) mukaisten intensiteettien perusteella sekä joka viides vuosi toistuvan sateen intensiteetit (kasvihuoneilmiön vaikutuksella ja ilman) 15, 30 ja 60 min sateilla.

kesto [min]	16 mm sateen intensiteetti [mm/min]	16 mm sateen toistuvuus	1/3a toistuvan sateen intensiteetti [mm/min]	1/5a toistuvan sateen intensiteetti [mm/min]
60	0,27	1/2a...1/3a	0,28	0,32
30	0,53	1/5a...1/10a	0,43	0,50
15	1,07	> 1/10a	0,67	0,73

16 mm sade toistuu tunnin kestoisena reilun parin vuoden välein. Puolen tunnin sateena sademäärä toistuu viiden...10 vuoden välein ja lyhyenä 15 minuutin rankkasateena yli

10 vuoden välein. Viivytystarve tarkastellaan 60 ja 30 minuutin sateiden kestolla. Taulukkoon 56 on koottu EIA:n, C_{vol} ja C_{max} muodostuminen TIA:n perusteella. Taulukkoon on laskettu EIA:n ja C_{vol} välinen ero muodostuvassa hulevesimäärässä 16 mm sateella, kun imeytymistä ja painannesäilyntää ei huomioida. Esimerkiksi 50 % TIA:n arvolla valuntakertoimen ja EIA:n välinen ero 16 mm sateella on noin 2 mm.

Taulukko 56. *EIA, C_{vol} ja C_{max} määrittäminen TIA:n perusteella. EIA:n ja C_{vol} ero muodostuvan huleveden määrässä on laskettu suoraan sademäärästä (painannesäilyntään osuutta tai imeyntä ei ole huomioitu).*

TIA [%]	EIA [%]	C_{vol} [-]	C_{max} [-]	EIA:n ja C_{vol} ero 16 mm sateella [mm]
10	0	0	0,28	0
20	8	0,06	0,37	0,3
30	19	0,13	0,46	1,0
40	30	0,20	0,55	1,7
50	41	0,26	0,64	2,3
60	52	0,33	0,73	3,0
70	62	0,39	0,82	3,7
80	73	0,46	0,91	4,4
90	84	0,53	1,00	5,0
100	95	0,59	1,00	5,7

Rajamäen mallinnusalueesta läpäisemätöntä pintaa on 47 %. TIA:n perusteella laskettuna EIA:n osuus on 0,39, C_{vol} on 0,25 ja C_{max} on 0,61. Alkuperäinen Rajamäen alueen valumakerroin C on 0,51 eli puolet C_{vol} suurempi mutta 15 % C_{max} kerrointa pienempi. Mallinnuksessa mitoitussateen (16 mm) vaikutus verkoston ja viivytystarve rakenteen vedenpinnankorkeuteen tarkasteltiin 30 ja 60 minuutin kestoisena sateena. Tulokset on koottu taulukkoon 57.

Taulukko 57. *Verkoston tulvivien kaivojen lukumäärä ja viivytystarve 16 mm sateilla, kun sateen kesto on 60min ja 30min. Muodostuva hulevesimäärä on arvioitu TIA:n (SWMM) C:n (MRM) kertoimien avulla, sekä EIA:n perusteella. EIA_p menetelmissä viheralueiden hulevesikerroin C ja EIA on 0. Taulukossa T on tulvivien kaivojen määrä.*

Sateen kesto [min]	Viivytystarve SWMM		Viivytystarve MRM	
	TIA [m ³]	EIA* [m ³]	C [m ³]	C_{vol} * [m ³]
60	600	510	650	360
30	690	595	780	430
15	715	610	765	455

*Laskettu TIA:n perusteella

Tunnin kestoisella 16 mm sateella viivytystarve on TIA:n ja C:n mukaan laskettuna 600...650 m³ ja puolen tunnin sateella noin 100 m³ enemmän. EIA:n arvoilla laskettuna viivytystarve pienenee 15 %. Valuntakertoimen C_{vol} määrittäminen TIA:n perusteella pien-

tää viivytystarvetta 45 %. Viivytyksrakenteen tilatarpeessa on eroa noin $150 \text{ m}^3 C_{\text{vol}}$ ja EIA:n välillä.

Viivytystilavuustarve 1/5a sateen toistuvuudella, dynaamisella laskentamenetelmällä on $750 \dots 800 \text{ m}^3$. EIA-menetelmän mukaisella mitoituksella rakenteen viivytystarve on 600 m^3 . Tätä suuremmat vesimäärät johdetaan tulvareittisuunnittelun mukaisesti.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Mallinnusohjelmien käyttö hulevesien hallinnassa mahdollistaa alueen monipuolisemman tarkastelun vaihtelevissa sadetilanteissa. Nykyinen hulevesien mitoitusohjeistus on laadittu käsin laskemista varten, eikä mallinnusta varten ole laadittu ohjeistusta. Sillanpään (2013) tutkimusten perusteella nykyistä hulevesiohjeistusta tulisi tarkistaa tavanomaisten sateiden viivyttämisessä ja käsittelyssä käytettävien valumakertoimien ja sademäärien osalta. Rakentamisen vaikutukset ovat suurimmat 16 mm ja tätä pienemmillä sadetapahtumilla, jolloin hulevettä muodostuu läpäisemättömiltä pinnoilta, jotka ovat hydraulisesti yhteydessä kuivatusjärjestelmään. Tätä suuremmat sateet johdetaan tulvareitin mukaisesti.

Mallinnusta varten tulee valita käyttötarkoitukseen sopivat laskentamenetelmät ja sopivat parametrit. Menetelmää valitessa ja tuloksia tarkastellessa kannattaa huomioida lähtötietojen tarkkuus: jos maaperästä, läpäisevien pintojen tulevasta määrästä tai pintojen kaltevuudesta, hulevesiverkostoon liitetyistä alueista yms. ei ole olemassa tarkkoja tietoja, saadut mallinnustulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia. Käytettäessä rationaalista menetelmää (RM) tai sen sovellusta (MRM), tulee huomata että viivytyrakennetta, verkostoa ja tulvareittiä mitoitettaessa sateen intensiteetin lisäksi käytettyä valuntakerointa voi/tulee muuttaa.

Tässä työssä käytettiin SWMM-menetelmää, sovellettua rationaalista menetelmää ja käsin laskentaa. Rationaalisen menetelmän ja sovelletun rationaalisen menetelmän käyttö on yksinkertaista: osavaluma-alueille tarvitsee antaa valuntakerroin ja valunta-aika. SWMM-menetelmässä osavaluma-alueiden tietoihin tulee syöttää läpäisemättömän pinnan osuuden lisäksi imeytämentelmä ominaisuuksineen, valuma-alueen kaltevuus, hydraulinen leveys painannesäilynnän määrä ja karkeuskertoimet läpäisevälle ja läpäisemättömälle pinnalle.

Tarkempien valuma-alueen ominaisuuksien syöttäminen mahdollistaa erilaisten hulevesimäärien muodostumisen sateen ja valuma-alueen ominaisuuksista riippuen. Lyhyillä ja pienillä sademäärillä suurin osa sateista voi jäädä painanteisiin tai imeytyä maaperään ja hulevedeksi muodostuva osuus sateesta kasvaa vasta suuremmilla sadetilanteilla. Rationaalisessa menetelmässä hulevedeksi muodostuva osuus vesimäärästä on vakio sateen intensiteetistä tai kestosta riippumatta.

Menetelmien välinen ero Rajamäen tarkastelualueella valunnan määrässä oli 15 minuutin sateella keskimäärin 0,5 mm ja 60 min sateella 0,7 mm. Erot olivat suurimpia alueilla, joissa rakennettua pintaa oli vähän ja maaperä oli joko savista tai soraista.

Laskentamenetelmien väliset erot osavaluma-alueilta purkautuvissa huippuvirtaamissa jäivät käytetyissä mallinnustapauksissa pieniksi. Osavaluma-alueilta purkautuvien huippuvirtaamien ero oli noin 75 %:lla osavaluma-alueista alle 1 l/s. Huippuvirtaamien ero oli suurempi kuin 5 l/s vain 2...7 osavaluma-alueella. Huippuvirtaamien erot keskittyivät samoille alueille, joissa hulevesien muodostumisessa oli eroja.

Mallinnusohjelmien A ja B välillä ei ollut merkittäviä eroja laskettaessa huleveden muodostumista. Ohjelmien väliset erot muodostuivat vasta hydraulisen laskennan yhteydessä, linjojen mitoituksen ja viivytyrakenteiden koon määrittämisen yhteydessä. Ohjelman A:n käyttämä dynaaminen laskentamenetelmä mahdollistaa tarkemman verkostolaskennan kuin ohjelma B:n Convex-menetelmä. Rajamäen alueella dynaamisella laskentamenetelmällä verkostossa ei havaittu tulvivia kaivorakenteita ja noin 20 % linjaosuuksista oli täynnä. Ohjelma B:n Convex-menetelmällä samalla valunta- ja sadetilanteella 15 % kaivoista tulvi ja 65 % linjoista oli täynnä vettä. Ohjelmalla A saatiin tietoa tulvivasta vesimäärästä, jota ohjelma B ei pystynyt määrittämään.

Mitoitussateen toistuvuudella on huomattava vaikutus viivytystarpeeseen. Joka vuosi toistuvalla sateella mitoitettu rakenne on noin 40 % pienempi kuin joka viides vuosi toistuvalla sateella mitoitettu rakenne. Sillanpään (2013) esittämä 16 mm sademäärän käyttö viivytyrakenteen mitoituksessa vastasi noin joka kolmas vuosi toistuvan sateen rakennetta. Käytetty hydraulinen laskentamenetelmä vaikutti viivytystarpeeseen enemmän kuin valuntamenetelmä tässä mallinnuksessa käytetyillä arvoilla. Suurimmat tilavuudet saatiin laskemalla käsin. Mallintamalla viivytystarve pieneni seuraavassa järjestyksessä: ohjelma B MRM, ohjelma B SWMM, ohjelma A MRM, ohjelma A SWMM.

Määritettäessä Kylänpään viivytyrakenteita MRM-menetelmällä, ohjelmalla A saatiin noin 30 % pienempi viivytystarve käsin laskettuun viivytystilavuuteen verrattuna. Käytännössä tämä tarkoittaa keskimäärin 150 m³ pienempiä viivytyrakenteita. Ohjelman B ero käsin laskettuun viivytysmäärään oli noin 5 % luokkaa. Ohjelman A ja B ero viivytyrakenteen purkuputken mitoituksessa vaihteli 10...20 % välillä.

Rajamäen alueella SWMM-menetelmällä viivytystarve oli 5...10 % eli noin 50 m³ pienempi kuin MRM-menetelmällä. Dynaamisella laskentamenetelmällä lasketut tilavuudet olivat 5...20 % pienempiä kuin Convex-menetelmällä. Esimerkiksi joka viides vuosi toistuvalla sateella viivytystarve vaihteli 750...980 m³ välillä. Pienin tilavuustarve saatiin ohjelmalla A SWMM-menetelmällä ja suurin ohjelmalla B MRM-menetelmällä.

Viivytyrakenteen mitoitus 16 mm sateella EIA:n perusteella pienensi viivytystarvetta 15 % TIA:n mukaiseen laskentaan verrattuna. MRM-menetelmällä C_{vol} valuntakertoimen käyttö pienensi viivytystarvetta 45 % käytettyyn C valuntakertoimeen verrattuna.

Mallinnustuloksia analysoitaessa on huomattava lähtötietojen lisäksi valittujen laskentamenetelmien vaikutus mallinnustuloksiin. Mallin kalibrointi parantaa tulosten luotet-

tavuutta, mutta harvoin malli voidaan toteuttaa niin tarkkana, että sitä voidaan pitää ”täydellisenä” tilanteen kuvauksena.

Ohjelmien käytettävyydessä ja laskennan sujuvuudessa oli eroja. Ohjelma B:llä tiedon siirto ja muokkaus oli helpompaa ja muokkausmahdollisuudet monipuolisemmat ohjelmaan A verrattuna. Esimerkiksi tiettyjä valuma-alueen ominaisuuksia pystyi muuttamaan ohjelmalla A vain syöttämällä uudet ominaisuusarvot yksitellen jokaiselle valuma-alueelle. Ohjelmassa B kaikki muutokset pystyi tekemään matemaattisilla lausekkeilla kaikkiin haluamiinsa valuma-alueisiin kerralla. Ohjelmassa A oli käytössä ohjelmaa B parempi hydraulinen laskentamenetelmä, mutta ohjelmasta puuttui luonnonmuokaisten hallintamenetelmien mallintamistyökalut. Ohjelmalla B laskenta oli raskaampaa ja laskenta kesti selkeästi ohjelmaa A pidempään. Ohjelmalla A laskenta kesti vain sekunteja, ohjelmalla B laskenta kesti pisimmillään useamman minuutin. Laskentamenetelmän päivitys mahdollistaa saman dynaamisen laskentamenetelmän hyödyntämisen kuin ohjelmassa A. Laskentamenetelmän päivitys luultavasti myös nopeuttaa laskentatapahtumaa.

LÄHTEET

- Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen J., Kotro, J., Kuitunen T., Ollila M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiïhonen, T., Tuomenvirta, H. & Vajda, A. (2008) Rankkasateet ja taajamatulvat. Suomen Ympäristö 31/2008. 123 s.
- Asemakaavamerkinnt ja -määräykset. (2003). Maankäyttö- ja rakennuslaki 2000, opas 12. Ympäristöministeriö, Helsinki. 236 s.
- Barnard, E., Dietrich, K., Stafaci, A. Totz, C. Walski, T. Barnard, T., Harold, E., Merritt, L., Walker N., Whitman, B., Hill, C., McKay, G, Plante, S., Schmitz. B. (2007). Wastewater Collection System Modelling and Design. 1st edition. Exton, USA. Bentley Institute Press. 606 s.
- Brown, S., Schall, J., Morris, J., Doherty, C., Stein, S. & Warner, J. (2009). Urban Drainage Design Manual – Hydraulic Engineering Circular 22, Third edition. 478 s.
- Butler, D. & Davies J. W. (2004). Urban Drainage 2nd edition. Spon Press. London and New York. 543 s. ISBN 0-415-30607-8.
- Department of Irrigation and Drainage Malaysia. (2012). Urban Storm Water Management (MSMA). Chapter 14 – Flow Estimation and Routing. 32 s.
- Djordjevic, S., Prodanovic, D. Mksimovic, C.(1999). Water Science and Technology. Vol 39 (9), s. 95-103.
- EPA 833-F-00-008. (2000). Storm Water Phase II Final Rule: Construction Site Runoff Control minimum control measure. Fact Sheet 2.6, 4 s.
- EPA 821-R-99-012. (1999). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. Washington DC. 193 s.
- Federal Interagency Stream Restoration Workin Group (FISRWG). (1998). Stream Corridor Restoration, Principles, Processes and Practices. National Engineering Handbook 653. USDA. 637 s.
- Gironás, J., Roesner, L. and Davis, J. (2009). Storm Water Management Model Applications Manual. EPA/600/R-09/077. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. 180 s.
- Goswami, I. (2012). Civil Engineering All-In –One PE Exam Guide: Breadth and Depth, Second Edition. The McGraw-Hill Companies.
- Hagelberg, E. Karhunen, A., Kulmala, A., Larsson, R. & Lundström E. 2012. Käytännön kosteikkosuunnittelu. Teho-hankkeen julkaisuja 1/2012. 29 s.

Helsingin kaupunki. (2013). Helsingin kaupungin työmaavesiohje. 7 s. Saatavissa: <http://dev.hel.fi/paatokset/media/att/5a/5af25e9c60eb7b4f0a8f24dd374a92e7869b4906.pdf>.

Hyöty, P., Lehtikangas S., Meriluoto J. (2007). Kuopion kaupunki. Hulevesien luonnonmukaisen hallinnan menetelmät. Suunnitteluohje. Suunnittelukeskus Oy. 43 s.

Ilmastonkestävän kaupungin suunnitteluopas. 2015a. Hulevesien hallintarakenteet ja niiden kunnossapito. 43 s. Saatavissa http://www.ymk-projektit.fi/suunnitteluopas/files/2014/07/3.2.Hulevesien-hallintarakenteet-ja-niiden-kunnossapito_työkalu.pdf.

Ilmastokestävän kaupungin suunnitteluopas. 2015b. Prosessikuvaus hulevesien suunnittelusta ja rakentamisesta (excel). Internetsivut. [Viitattu 15.4.2015]. Saatavissa: <http://ilmastotyokalut.fi/hulevesien-hallinta/suunnittelusta-kayttajille/>.

Ilmatieteenlaitos. (2015) Äkkitulvien vaikutuksia Suomessa. [Viitattu 4.3.2015]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/akkitulvien-vaikutuksia>.

InfraRYL 2009/2. (2009). Suomen Rakennusinsinöörien Liito RIL ry. Saatavissa www.rakennustieto.fi/infraryl.

Karamouz, M. Moridi A. & Nazif, S. (2010). Urban Water Engineering and Management. CRS Press. ISBN 978-1-4398-1310-2.

Karttunen, E. & Tuhkanen, T. (2003). RIL 124-1 Vesihuolto I. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 314 s.

Karttunen, E. Tuhkanen, T. & Kiuru, H. (2004). RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 684 s.

Kling, T., Holt, E., Kivikoski, H., Korkealaakso, J., Kuosa H., Loimula K., Niemeläinen E., Törnqvist J. (2015). Vettä läpäisevät päällysteet. Käsikirja suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon. VTT Technology 201. Grano Oy, Kuopio. 75 s.

Kuntaliitto. (2012). Hulevesiopas. Helsinki. Suomen kuntaliitto. 150 s.

Laki tulvariskien hallinnasta. 24.6.2010/620.

Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 30.12.2004/1299.

Lemminkäinen. (2010). Kiviasentajan käsikirja. 60 s. Saatavissa: <http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCoQFjAC&url=http%3A%2F%2F193.242.126.9%2FLink.aspx%3Fid%3D10022382&ei=S6pcVfTkH6adygOH->

ICABQ&usg=AFQjCNF63M2kCXC_IA1yXDf8FozODspzRg&sig2=1afteo9a4MJBzVqJ_y_Uog&bvm=bv.93756505,d.bGQ.

Liikennevirasto. (2013). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2013. Helsinki. 114 s.

Lyngfelt, S. (1985). On Urban Runoff Modelling – The Application of Numerical Models Based on the Kinematic Wave Theory. Göteborg. Chalmers University of Technology. 195 s.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. Djordjevic S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. Journal of Hydrology. Vol. 299 (3-4), s. 284-299.

Maryland Stormwater Design Manual Volumes I. (2000a). Maryland Department of the Environment in cooperation with the Maryland Department of Natural Resources Coastal Zone Management Program pursuant to National Oceanic and Atmospheric Administration. 289 s.

Maryland Stormwater Design Manual Volume II. (2000b). Maryland Department of Maryland Department of the Environment in cooperation with the Maryland Department of Natural Resources Coastal Zone Management Program pursuant to National Oceanic and Atmospheric Administration. 302 s.

Mays, L. (2001). Stormwater Collection Systems Design Handbook. U.S.A. New York. McGraw-Hill.

Mignot, E., Paquier, A. Haider, S. (2006). Modelling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. Journal of Hydrology. Vol. 327 (1-2), s. 186-199.

Mockus, V. & Styner, W. (1972). National Engineering Handbook, Section 4 Hydrology, Chapter 17 Flood Routing. 100 s. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.

MRL 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki.

Mustonen, S. (toim.) (1986). Sovellettu Hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Helsinki. Mäntän Kirjapaino Oy. 503 s.

Näreaho, T., Jormola J., Laitinen L. & Sarvilinna A. (2006). Maatalousalueiden perattujen purojen luonnonmukainen kunnossapito. Suomen Ympäristö 52/2006. Vammalan Kirjapaino Oy, 64 s.

Pajula, H. & Järvenpää L. (2007). Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 23/2007. 190 s.

Parjanne, A. & Huokuna, M. (2014). Tulviin varautuminen rakentamisessa. Opas alimpien rakentamiskorkeuksien määrittämiseksi ranta-alueilla. Ympäristöopas. 80 s.

PipeLife. (2014). Hulevesien viivytyssäiliö Ritaharjuun Oulussa. [Viitattu 7.5.2015]. Saatavissa: <http://www.pipelife.fi/fi/referenssit/Ritaharju-kiinteistokohtainen-viivytyssailio.php>.

RakMK A2. 8.5.2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen suunnittelijoista ja suunnitelmista.

RakMK D1. 24.1.2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistoista.

RIL 237-2-2010. (2010). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Vesihuoltoverkostojen suunnittelu. Mitoitus ja suunnittelu. 162 s.

Ristimäki, M., Oinonen, K., Pitkäranta, H. & Harju, K. (2003). Kaupunkiseutujen väestönmuutos ja alueellinen kasvu. Suomen ympäristö 657, Ympäristöministeriön julkaisu. Helsinki. 196 s.

Rossmann, L. (2010). Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.0. U.S. Environmental protection Agency. EPA/600/R-05/040. Cincinnati, Ohio. 285 s.

RT 38572. (2014). StormTech® -hulevesitunnelit, AdvanEDGE® -salaojaputki. Kaitos Oy. 2 s. Saatavissa: <http://www.kaitos.fi/tuoteryhmat/Hulevesij%C3%A4rjestelm%C3%A4t/787/stormtech-hulevesitunneli>.

Rudus. (2015). Vettä läpäisevät päällysteet hulevesien hallinnassa. [Viitattu 12.5.2015]. Saatavissa: <http://ruduspihablogi.fi/vetta-lapaisevat-paallysteet-hulevesien-hallinnassa/#!>.

Saarinen, U. (2011). Suomessa väki keskittyy taajamiin. Tilastokeskuksen internetsivut. [Viitattu 1.6.2015]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/vl2010/art_2011-12-16_001.html.

Schmitt, T., Thomas, M., Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. Journal of Hydrology 299. ps. 300-311.

Sillanpää, N. (2013). Effect of suburban development on runoff generation and water quality. Aalto Yliopisto. Doctoral dissertations 160/2013. 226 s.

Suomen ympäristökeskus. (2010). Tausta-asiakirja hulevesitulvariskien alustavaan arviointiin. Suomen Ympäristökeskus ja ELY-keskukset. [Viitattu 25.2.2015]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Tulviin_varautuminen/Tulvariskien_hallinta/Tulvariskien_hallinnan_suunnittelu/Tulvariskien_alustava_arviointi_hulevesitulvat.

FI/Vesi/Tulviin_varautuminen/Tulvariskien_hallinta/Tulvariskien_hallinnan_suunnittelu/Tulvariskien_alustava_arviointi_hulevesitulvat.

Särkiaho, L. & Sillanpää, N. (2012). Stormwater-hankkeen loppuraportti. Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Espoo. 60 s. Aalto-yliopiston julkaisusarja Tiede+teknologia 4/2012.

Tielaitos. (1993). Teiden suunnittelu IV. Tien rakenne, osa 4. Kuivatus. Helsinki. 69 s.

Tornivaara-Ruikka, R. (2006). Hulevesien käsittely maankäytön suunnittelussa. Uudenmaan ympäristökeskuksen raportteja 3/2006. Uudenmaan Ympäristökeskus. Kuikka. 38 s.

United States Department of Agriculture (USDA). (1986). Urban hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. 164 s.

United States Department of Agriculture (USDA). (2009). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Small Watershed Hydrology WinTR-55 User Guide. 142 s.

United States Department of Agriculture (USDA). (2010). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 15. Time of Concentration. 29 s.

United States Department of Agriculture (USDA).. (2014). Natural Resources Conservation Service (NRCS)Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. Chapter 17. Flood Routing. 78 s.

Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD). (2009). Modelling Hydraulic and Energy Gradients in Storm Sewers: A Comparison of Computational Methods. AMEC Earth & Environmental Inc. Colorado. 34 s.

Uponor. (2013). Uudet ympäristöystävälliset ja tehokkaat ratkaisut hulevesien käsitteilyyn. 6 s. Saatavissa: https://www.uponor.fi/~media/countryspecific/finland/download-centre/house-drainage/brochures/hulevesikasetit_ja_tunnelit_2013.pdf?version=2.

Valtanen, M., Sillanpää N., Hättinen, N. & S Setälä, H. (2010). Hulevesien imeyttäminen ja suodattaminen: häirtä-aineet ja menetelmät. Stormwater-hankkeen kirjallisuusselvitys. 48 s. Saatavissa:

http://www.researchgate.net/profile/Nora_Sillanpaa/publication/230854077_Hulevesien_imeyttäminen_ja_suodattaminen_hairta-aineet_ja_menetelmt/links/0fcfd5056c95f82985000000.pdf

Van Waveren, R.H., Groot, S., Scholten, H., van Geer, F.C., Wosten, J., Koeze, R. & Noort, J. (1999). Good Modelling Practice Handbook. Lelystad, Netherlands: RWS-RIZA. STOWA Report 99-05. 165 s. Saatavissa:
<http://harmoniqua.wur.nl/public/Reports/Existing%20Guidelines/GMP111.pdf>.

Wavin Labko. (2015). Erotinjärjestelmät. [Viitattu 12.5.2015]. Saatavissa:
<http://www.wavin-labko.fi/tuotteet/erotinjarjestelmat/>

Vesienhoitolaki. 30.12.2004/1299.

Vesihuoltolaki. 9.2.2011/119.

VL 27.5.2011/587. Vesilaki.

Vna 30.11.2006/1040. Valtioneuvoston asetus vesienhoidon järjestämisestä.

Vnp 13.11.2008. Valtioneuvoston päätös valtakunnallisten alueidenkäyttötavoitteiden tarkistamisesta. (2008). Helsinki. 23 s.

Yleiskaavan sisältö ja esitystavat. (2006). Maankäyttö ja rakennuslaki 2000 - julkaisusarja. 73 s.

Ympäristöministeriö. (2007). Vesiensuojelun suuntaviivat vuoteen 2015. Valtioneuvoston periaatepäätös. Suomen ympäristö 10/2007. 93 s.

Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista. 17.6.2014.

Ympäristönsuojelulaki. 27.6.2014/527.

Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. Environmental Modelling & Software. Vol. 16, s. 195-231.